

Nuove tecnologie in zuccherificio

di Giuseppe Vaccari

La produzione di zucchero da bietola, ancorata alla tradizionale depurazione calco-carbonica, è certamente coinvolta in modo non indifferente in problematiche di tipo ambientale, in particolare per quanto riguarda il consumo di calcare e la conseguente produzione di fanghi di carbonatazione. Vengono descritte alcune delle sperimentazioni fino ad ora condotte per eliminare completamente dal ciclo di lavorazione la tradizionale depurazione calco-carbonica utilizzando tecnologie eco-compatibili.

La tecnologia di produzione dello zucchero dalla bietola, iniziata circa duecento anni fa, ha subito in questi ultimi decenni profondi cambiamenti seguendo l'evoluzione del mondo industriale in generale, con particolare riguardo al controllo e all'automatizzazione degli impianti, ma è sempre rimasta ancorata ad uno schema di lavorazione di base che prevede le seguenti fasi:

- 1) trasporto idraulico e lavaggio delle bietole;
- 2) taglio in fettucce;
- 3) diffusione con acqua a temperatura relativamente elevata per l'estrazione dello zucchero (e dei non-zuccheri) e ottenimento del cosiddetto *sugo greggio*;
- 4) depurazione del sugo greggio realizzata con latte di calce, anidride carbonica e resine a scambio ionico;
- 5) concentrazione del sugo depurato in evaporatori a multiplo effetto in equicorrente a temperatura relativamente elevata;
- 6) cristallizzazione in più stadi per ebollizione, con riciclo dello zucchero prodotto negli ultimi stadi di cristallizzazione.

Nella Figura 1 vengono schematizzate le varie fasi sopra descritte mettendo in evidenza i dettagli della depurazione calco-carbonica che viene realizzata con latte di calce e comprende diverse fasi:

- a) una prima aggiunta graduale di calce (predefecazione);
- b) un'ulteriore aggiunta più massiccia di calce a temperatura elevata (defecazione);
- c) una prima carbonatazione della calce con CO_2 ;
- d) una prima filtrazione;
- e) una seconda carbonatazione con CO_2 ;
- f) una seconda filtrazione;

G. Vaccari, Dipartimento di Chimica - Università di Ferrara - Via Borsari, 46 - 44100 Ferrara. vcg@unife.it. Comunicazione presentata al XIV Congresso Nazionale della Divisione di Chimica industriale "Nuovi orientamenti nell'industria chimica" - Milano, 3-4 ottobre 2001.

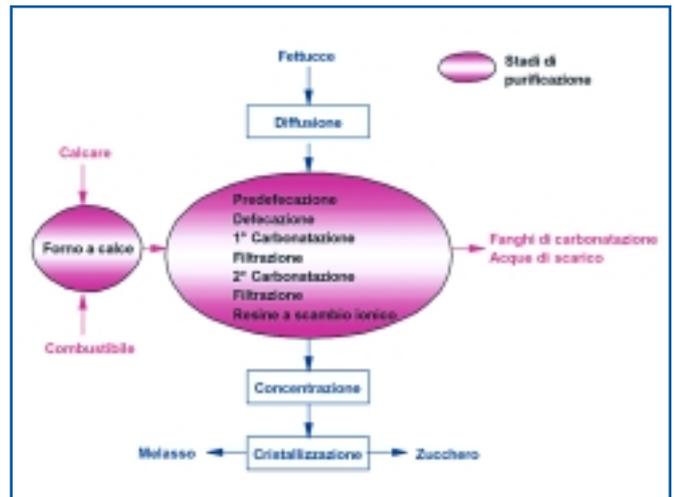


Figura 1 - Schema semplificato del tradizionale processo di produzione dello zucchero da bietola

g) un trattamento con resine a scambio ionico con lo scopo di decalcificare e/o demineralizzare il sugo.

In questa fase di depurazione la quantità di calce che deve essere utilizzata è particolarmente rilevante al punto che gli zuccherifici sono dotati di uno o più forni a calce alimentati con calcare e coke o altro tipo di combustibile. La quantità di calce utilizzata, sebbene possa variare in dipendenza della qualità delle bietole, si aggira su valori intorno al 4% bietole per cui, in Italia, dove vengono lavorate circa 13 milioni di tonnellate di bietole per campagna, vengono utilizzate circa 580.000 tonnellate di calcare producendo 1.300.000 tonnellate di fanghi di carbonatazione (al 50% di sostanza secca).

La depurazione calco-carbonica comporta ovviamente diversi vantaggi sulle caratteristiche del sugo di estrazione che deve essere sottoposto alle successive fasi di concentrazione e cristallizzazione:

- 1) eliminazione, seppur in modo parziale (20-30%), di composti non-saccarosio;
- 2) eliminazione della torbidità del sugo;
- 3) sterilizzazione della soluzione;
- 4) distruzione dei composti termolabili con la possibilità di concentrare il sugo a temperature relativamente elevate;
- 5) alcalinizzazione della soluzione che riduce i possibili fenomeni di inversione chimica del saccarosio;
- 6) abbattimento significativo del colore del sugo.

Accanto a questi vantaggi è però necessario tener conto di notevoli svantaggi che fino a diversi anni fa non venivano presi in grande considerazione:

- 1) problemi ambientali legati alla grande quantità di calcare di provenienza dalle cave;
- 2) problemi ecologici legati sia allo smaltimento dei fanghi di

carbonatazione sia alla produzione di odori, di anidride carbonica e di ammoniaca;

- 3) costi legati sia al consumo di energia sia al calcare stesso che deve essere di buona qualità;
- 4) produzione di acque di scarico, in particolare nel caso di utilizzo di resine demineralizzanti;
- 5) complessità degli impianti;
- 6) distruzione dei monosaccaridi e di altri zuccheri.

Sebbene in questi ultimi anni si sia cercato di diminuire, nei limiti del possibile, il consumo di calce, i problemi cui fatto cenno possono essere risolti in modo radicale solo eliminando completamente dal ciclo di lavorazione la depurazione calco-carbonica. In questo caso però bisogna tener presente che il sugo che dovrebbe essere concentrato e cristallizzato è di colore scuro, acido, torbido, termolabile, non sterile e che contiene una quantità di non-zuccheri superiore rispetto al sugo depurato. Per poter superare tali problemi è necessario fare ricorso a tecnologie nuove per il mondo saccarifero che siano nello stesso tempo ecocompatibili e che, possibilmente, non comportino aggravamenti nei costi di produzione. Tali nuove tecnologie possono comprendere la concentrazione a bassa temperatura, la cristallizzazione per raffreddamento, la microfiltrazione e la separazione cromatografica. Mentre la microfiltrazione è una tecnica che già viene ampiamente utilizzata nel campo agro-alimentare [1] e la separazione cromatografica viene comunemente utilizzata anche in campo saccarifero nel trattamento del melasso [2], la concentrazione a bassa temperatura e la cristallizzazione per raffreddamento, sono pratiche di lavoro di cui, fino ad ora, non si era sentita l'esigenza dovendo concentrare e cristallizzare un sugo depurato. Se però vogliamo cristallizzare un sugo non sottoposto a trattamento con calce, tali tecniche risultano indispensabili. In particolare, tenendo conto che il sugo di estrazione è acido e che la costante di inversione del saccarosio è tanto più alta quanto più alta è la temperatura e quanto più diluita è la soluzione, la pratica

della concentrazione in impianti a multiplo effetto in equicorrente con temperature elevate (125 °C) sul sugo diluito risulta la meno adatta. È inoltre necessario tener conto che il sugo non depurato contiene tutta la frazione organica azotata e i monosaccaridi presenti nella bietola che, con le alte temperature, favoriscono la formazione di colore attraverso la reazione di Maillard. Ecco che allora si rende necessario eseguire la concentrazione del sugo non depurato in impianti sotto vuoto in controcorrente in cui il sugo diluito sia fatto bollire a temperature non superiori ai 50 °C e aumentando questa temperatura nei successivi corpi di evaporazione fino alla temperatura di inizio cristallizzazione (80-85 °C). Il mante-

nere temperature basse, in particolare nel sugo diluito, limita inoltre la distruzione dei monosaccaridi che, ritrovandosi nel melasso, possono essere resi disponibili nella lavorazione di quest'ultimo nel campo delle biotecnologie.

Anche la cristallizzazione per raffreddamento risulta altrettanto indispensabile tenendo presenti i vantaggi che essa comporta in confronto con la cristallizzazione per ebollizione. Cristallizzando per semplice raffreddamento è infatti possibile ottenere cristalli di buona qualità commerciale anche partendo da soluzioni particolarmente impure o colorate. Questo perché la causa principale dell'accumulo di impurezze all'interno dei cristalli è l'inglobamento di soluzione madre; tale inglobamento è reso tanto più facile quanto più elevata è la cinetica di crescita dei cristalli (Figura 2) ed è favorito dalla formazione di bolle di vapore sulla superficie dei cristalli stessi [3]. Tenendo presente che la cinetica di crescita dei cristalli, durante la cristallizzazione per ebollizione a temperatura elevata, non può essere mantenuta a valori sufficientemente bassi sia per difficoltà tecniche sia per problemi di tipo energetico e di stabilità del sugo, è evidente che la cristallizzazione per raffreddamento risulta ancora una scelta obbligata. Tale tecnica di cristallizzazione, che non produce bolle di vapore e può essere resa lenta quanto si desidera senza problemi, risulta anche di gestione molto più semplice di quella tradizionale e può essere resa continua, ad esempio, in cristallizzatori verticali raffreddati con acqua. Il sugo leggermente sovrassaturo in uscita dall'impianto di concentrazione può essere introdotto, dopo aggiunta del "seme", alla sommità di un cristallizzatore verticale raffreddato in controcorrente con acqua. Regolando opportunamente i flussi è possibile condurre la cristallizzazione nel modo ottimale raccogliendo in modo continuo il magma da centrifugare alla base del cristallizzatore stesso. Ovviamente deve essere seguito un profilo ottimale della curva di raffreddamento e, per poter ottenere cristalli di buona qualità, è necessario mantenere tempi di cristallizzazione più lunghi rispetto a quelli della cristallizzazione di tipo tradizionale. Le strategie che possono essere seguite per eliminare completamente la depurazione calco-carbonica possono essere le seguenti (Figura 3):

- 1) concentrazione in controcorrente e cristallizzazione diretta per raffreddamento del sugo greggio tal quale con ottenimento di zucchero greggio in due o più passaggi da sottoporre a processo di raffinazione (come per lo zucchero greggio di canna);
- 2) microfiltrazione del sugo greggio, demagnesizzazione con resine a scambio ionico, concentrazione in controcorrente e cristallizzazione per raffreddamento con ottenimento di zucchero bianco commerciale nel primo stadio di cristallizzazione e zucchero da riciclare negli stadi successivi;
- 3) microfiltrazione del sugo greggio, demagnesizzazione, separazione cromatografica, concentrazione della frazione ricca in zucchero e cristallizzazione per raffreddamento con la produzione di zucchero bianco commerciale nei primi due stadi di cristallizzazione e riciclo dello zucchero prodotto nei due stadi successivi;
- 4) microfiltrazione del sugo greggio, demagnesizzazione, concentrazione a bassa temperatura, cristallizzazione per raffreddamento per ottenere zucchero bianco commerciale; trattamento della soluzione madre della prima cristallizzazione con impianto di separazione cromatografica, decolorazione e cristallizzazione per raffreddamento della frazione ricca in zucchero per ottenere zucchero bianco nei primi due stadi e zucchero da riciclare nei successivi stadi.

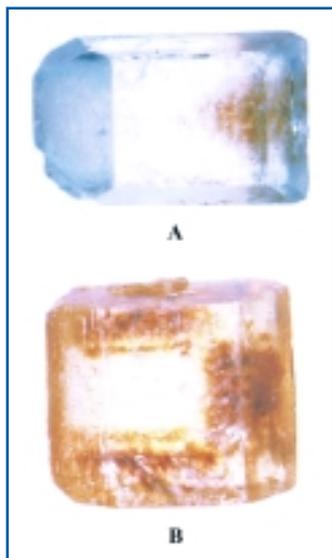


Figura 2 - Effetto della cinetica di crescita sulla possibilità di inglobamento di soluzione madre all'interno dei cristalli di zucchero: A) cinetica di crescita moderatamente elevata; B) cinetica di crescita molto elevata

Queste varie opzioni sono state oggetto di indagine grazie a finanziamenti ottenuti dalla Comunità Europea [4], progetti finalizzati finanziati dal Murst in collaborazione con Eridania [5] e al contributo della società Amalgamated Research Inc. (Usa), specializzata in impianti di separazione cromatografica. Cerchiamo ora di riassumere i risultati delle indagini effettuate sulle diverse opzioni mettendo in evidenza i vantaggi e gli svantaggi delle diverse scelte.

Opzione 1

Rappresenta il modo più semplice di affrontare il problema in quanto elimina completamente tutta la fase di depurazione senza introdurre altre complicazioni impiantistiche se si esclude la necessità di concentrare in controcorrente e cristallizzare per raffreddamento. Ovviamente lo zucchero che si ottiene nei due o tre stadi di cristallizzazione, in funzione delle caratteristiche del sugo di partenza, è zucchero che, comunque, deve essere raffinato tenendo presenti le caratteristiche (soprattutto la torbidità) del sugo di partenza. La raffinazione dello zucchero è un'operazione che può anche essere condotta durante l'intercampagna razionalizzando al meglio l'utilizzo degli impianti. Essa non presenta difficoltà (come nella raffinazione dello zucchero greggio di canna) e si realizza attraverso le fasi di affinazione (lavaggio dei cristalli), dissoluzione, filtrazione e cristallizzazione in più stadi utilizzando gli stessi impianti di cristallizzazione per raffreddamento utilizzati durante la campagna per produrre lo zucchero greggio. Ovviamente è stato necessario rispondere subito alla seguente domanda: la quantità di zucchero estraibile con tale sistema è paragonabile a quella che si ottiene attraverso la tecnologia tradizionale? È necessario infatti tener presente che, a causa della maggior quantità di non-zuccheri presenti nel sugo in assenza della depurazione calco-carbonica, risulta maggiore la quantità di melasso prodotto. È però stato possibile verificare che quei non zuccheri che non vengono eliminati o decomposti per l'assenza della depurazione calco-carbonica (magnesio, monosaccaridi, composti azotati ecc.) diminuiscono la solubilità del saccarosio permettendo un maggior recupero di zucchero cristallino che va a compensare la maggior quantità di melasso prodotto [6]. Tale melasso, il cui utilizzo riguarda sia il campo delle biotecnologie sia quello mangimistico, ha migliori caratteristiche rispetto a quello tradizionale in quanto in esso si trova tutta la componente azotata, il magnesio, i fosfati, i monosaccaridi ecc. che erano presenti nella bietola. Era legittimo porsi a questo punto un'altra domanda: come si presentano i cristalli di zucchero ottenibili con tale processo in confronto a quelli prodotti con la tecnologia tradizionale? La morfologia dei cristalli dello zucchero bianco raffinato è assolutamente analoga a quella dei cristalli tradizionali presentando però una maggiore "brillantezza", in quanto la cristallizzazione per raffreddamento non provoca quei fenomeni di instabilità delle facce del cristallo che si manifestano quando le bolle di vapore si formano sulla superficie dei cristalli stessi. Un discorso a parte deve essere fatto per lo zucchero greggio e in particolare per quello derivante dall'ultimo stadio di cristallizzazione. La mancata distruzione dei monosaccaridi e dei kestosi (trisaccaridi presenti nella bietola e al giorno d'oggi tenuti in grande considerazione come composti prebiotici) a causa dell'assenza della depurazione calco-carbonica, provoca modificazioni dell'abito dei cristalli che tendono a diventare di forma triangolare. Questo fatto però non determina alcun problema per la fase successiva di

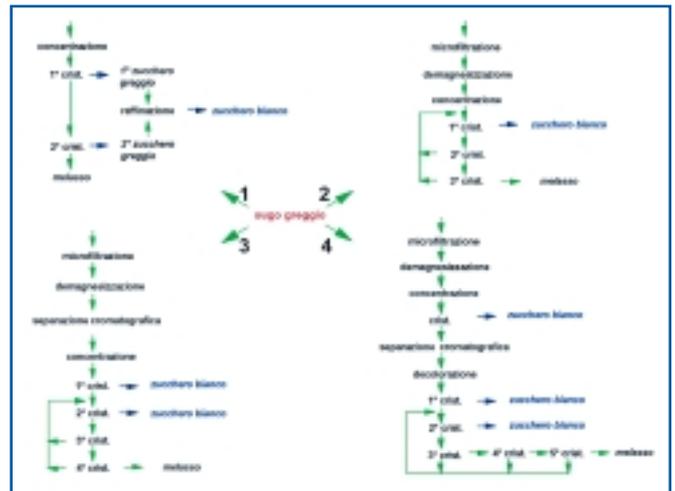


Figura 3 - Possibili schemi di lavoro che non utilizzano la depurazione calco-carbonica

recupero dei cristalli per centrifugazione. I risultati sopra descritti sono stati ottenuti non soltanto a livello di prove di laboratorio ma anche con un impianto pilota di dimensioni abbastanza rilevanti in grado di lavorare 4 m³ di sugo greggio per ora [7]. I positivi risultati ottenuti hanno permesso di brevettare il processo in ambito europeo [8].

Opzione 2

Volendo ottenere direttamente zucchero bianco commerciale dal sugo greggio non depurato escludendo la fase di raffinazione, era necessario tener conto della torbidità del sugo e della presenza di magnesio proveniente dalla bietola. Era infatti stato preventivamente osservato che la presenza di quantità eccessive di magnesio nel sugo da cristallizzare non permette di ottenere zucchero bianco di qualità commerciale in quanto i sali di magnesio finiscono per trovarsi all'interno dei cristalli aumentando il contenuto di "ceneri" dello zucchero stesso. La possibilità di risolvere tali problemi è stata individuata nel sottoporre il sugo greggio a preventiva microfiltrazione e "addolcimento" prima della concentrazione in controcorrente e della cristallizzazione per raffreddamento. Per la microfiltrazione sono state testate sia membrane di tipo organico sia ceramico in impianti sia di laboratorio sia pilota industriale. Per l'eliminazione del magnesio si sono utilizzate le tradizionali resine a scambio ionico. Dopo tali trattamenti il sugo può essere concentrato a bassa temperatura e cristallizzato per raffreddamento ottenendo zucchero bianco di qualità commerciale [9]. La soluzione madre della prima cristallizzazione può essere sottoposta a due successivi stadi di cristallizzazione ottenendo zucchero greggio che può essere riciclato in testa alla prima cristallizzazione (tali tipi di ricicli sono comuni anche nel caso della tradizionale tecnologia di lavorazione). Un confronto diretto fra la resa totale di zucchero cristallizzato da sugo greggio microfiltrato e sugo greggio sottoposto a trattamento di depurazione calco-carbonica ha mostrato, per quest'ultimo, valori solo leggermente più elevati [10]; il motivo di ciò, in confronto a quanto riportato nell'opzione 1, è da ricercarsi nel fatto che l'eliminazione del magnesio (noto soppressore della solubilità del saccarosio) comporta una minor resa di zucchero cristallizzabile. Questo schema di lavoro non si discosta profondamente dallo schema tradizionale tranne che per il fatto che

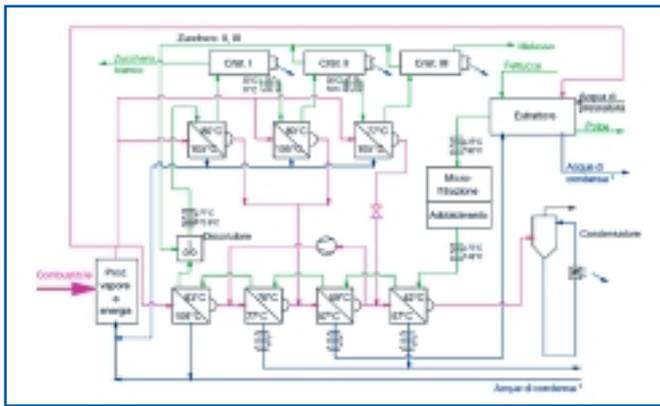


Figura 4 - Esempio di schema termico di una fabbrica che utilizza la microfiltrazione, concentrazione in controcorrente e cristallizzazione per raffreddamento; linee rosse: steam o vapore; linee blu: acque di condensa e raffreddamento; linee verdi: flussi di processo [11]

la depurazione calco-carbonica è sostituita dalla microfiltrazione. Questo tipo di approccio è stato accuratamente studiato anche dal punto di vista energetico applicando la *pinch technology* [11]. È stato possibile dimostrare che, con riferimento allo schema dettagliato riportato nella Figura 4, e utilizzando opportune scelte per quanto riguarda la produzione di vapore e di energia elettrica, come caldaie a bassa pressione o turbine a gas, è possibile ottenere un risparmio energetico rispetto alla tradizionale tecnologia di lavorazione che può arrivare al 30%. Anche questa tecnologia è stata sottoposta a brevetto europeo [12].

Opzione 3

I processi di separazione cromatografica sono già da molti anni applicati a livello industriale per il recupero dello zucchero dal melasso che, come è noto, rappresenta un sottoprodotto dell'industria saccarifera contenente circa il 50% di zucchero che non è possibile recuperare per semplice cristallizzazione. Tali processi, che oggi lavorano in continuo in modo completamente automatizzato (SMB - Simulated Moving Bed), permettono di separare il melasso in due frazioni, una ricca in zucchero (*extract*) e una ricca in non-zucchero (*raffinate*). Mentre quest'ultima frazione può essere utilizzata nel campo mangimistico o per il recupero di qualche prodotto ad alto valore aggiunto, la frazione ricca in saccarosio viene utilizzata per ottenere altro zucchero commerciale. Tale trattamento cromatografico può essere utilizzato direttamente sul sugo greggio non depurato se esso viene preventivamente sottoposto a microfiltrazione e addolcimento per eliminare, rispettivamente, la torbidità e gli ioni magnesio [13]. È necessario tener presente che attraverso il trattamento di separazione cromatografica si riesce ad eliminare dal sugo greggio il 75-80% dei non zuccheri (contro il 20-30% della depurazione calco-carbonica) e in particolare si riesce ad eliminare il 75% del colore, il 95% di sodio e potassio, il 40% di betaina, il 30% di raffinosisio e il 35% di monosaccaridi. L'*extract* che si ottiene ha quindi un "quoziente di purezza" particolarmente elevato (>96%) ed è quindi adatto, dopo concentrazione a bassa temperatura, ad essere sottoposto a 4 stadi di cristallizzazione per raffreddamento con l'ottenimento di zucchero bianco commerciale nei primi due stadi e riciclo dello zucchero derivante dagli ultimi due stadi

nella soluzione che va alla seconda cristallizzazione. La resa in zucchero cristallizzato è particolarmente elevata (circa il 96%) grazie all'eliminazione pressoché totale degli ioni alcalini (che come è ben noto aumentano la solubilità del saccarosio) e all'effetto depressivo sulla solubilità determinata da quella porzione dei composti non saccarosio che non viene eliminata (raffinosisio, zucchero invertito, betaina e kestosi). Questi composti, accumulandosi nell'ultimo stadio di cristallizzazione rendono un po' problematica la crescita dei cristalli nel quarto stadio in quanto rallentano la cinetica di crescita di alcune facce del cristallo modificandone anche la morfologia. Questi problemi sono però risolvibili o attraverso un miglioramento del processo di separazione cromatografica (Coupled Loop Chromatographic Process) o eliminando l'effetto interferente di qualche componente come il raffinosisio che, con l'utilizzo dell' α -galattosidasi, può essere trasformato in saccarosio e galattosio migliorando la resa in zucchero. Una critica che può essere posta a questo tipo di opzione è che per trattare tutto il sugo greggio prodotto giornalmente in uno zuccherificio durante il periodo di lavorazione sono necessari impianti cromatografici di dimensioni imponenti con costi impiantistici rilevanti. Questo problema può trovare però subito una soluzione nel fatto che il sugo microfiltrato è praticamente sterile e si è rivelato adatto, dopo concentrazione, ad essere conservato per lunghi periodi senza problemi. Ecco che allora è possibile lavorare il sugo microfiltrato durante l'intercampagna utilizzando impianti sia cromatografici sia di cristallizzazione di modeste dimensioni.

Opzione 4

Questa proposta di lavoro racchiude in sé alcuni dei vantaggi derivanti dalle due opzioni precedenti. Come nell'opzione 2 il sugo greggio può essere, dopo microfiltrazione e addolcimento, concentrato a bassa temperatura e cristallizzato per raffreddamento con l'ottenimento di zucchero commerciale. La soluzione madre della prima cristallizzazione, che come massa rappresenta solo una porzione del sugo greggio di partenza, può essere sottoposta a trattamento di separazione cromatografica utilizzando, ovviamente, impianti di dimensioni più ridotte rispetto al caso dell'opzione 3. Se la frazione ricca in zucchero in uscita dal processo di separazione cromatografica è sottoposta ad un trattamento di decolorazione si può ottenere una soluzione con un elevato quoziente di purezza (fino a 98) e con un basso colore in grado di fornire, attraverso cinque stadi successivi di cristallizzazione per raffreddamento, zucchero bianco commerciale nei primi due stadi e zucchero greggio nei tre successivi che dovrebbe essere riciclato nella soluzione della prima cristallizzazione. Dato l'elevato quoziente dell'estratto cromatografico la resa in zucchero complessiva nei cinque stadi di cristallizzazione supera il 97%. Ovviamente sono possibili soluzioni alternative come quella di riciclare parte dello zucchero greggio prodotto nel sugo greggio microfiltrato migliorando le caratteristiche del "primo" zucchero bianco prodotto. Le problematiche relative alla conduzione delle ultime fasi di cristallizzazione per raffreddamento descritte nell'opzione precedente, e le possibili soluzioni, possono essere riscontrate anche in questo tipo di schema di lavoro.

Conclusioni

È stato messo in evidenza che la tradizionale depurazione calco-carbonica, pur con i benefici che essa comporta, è una pra-

tica di lavoro che è diventata troppo onerosa dal punto di vista ambientale ed ecologico ed è auspicabile che essa possa essere completamente eliminata e sostituita da tecnologie che siano più compatibili con l'ambiente.

Abbiamo riportato alcune delle possibili soluzioni che oltre ad essere ecocompatibili possono comportare semplificazioni dal punto di vista impiantistico e/o riduzioni dei consumi di energia. Il motivo per il quale abbiamo cercato di proporre varie soluzioni deriva dal fatto che riteniamo che non ci possa essere un'unica soluzione valida in tutte le situazioni, ma che, in dipendenza delle esigenze locali legate alla caratteristica della materia prima, alla capacità degli impianti, alle disponibilità energetiche ecc., ci debba essere la possibilità, per il mondo industriale saccarifero, di poter scegliere fra opzioni diverse. Certamente il convertire una tecnologia profondamente radicata e altamente specializzata in una nuova tecnologia di produzione non sarà un'operazione facile tenendo anche presenti le realtà industriali già attualmente esistenti.

C'è inoltre da tener presente che, fino al momento attuale, ancora non esistono veri impianti produttivi di dimensioni industriali che utilizzano una delle varie tecnologie proposte e che possano fare da battistrada per un cambio tecnologico generalizzato. I risultati descritti, infatti, si riferiscono a prove realizzate con impianti pilota che attendono ancora delle conferme legate ai passaggi di scala. Questi ultimi richiedono ingenti investimenti che, ovviamente, presentano sempre un certo grado di rischio. Non bisogna poi trascurare il fatto che negli ultimi anni il mondo industriale saccarifero ha investito ingenti somme nell'ammmodernamento degli impianti tradizionali e questo non facilita la scelta nei confronti di nuove tecnologie. Riteniamo comunque positivo l'aver potuto dimostrare che, con una opportuna scelta delle tecnologie, è possibile produrre zucchero da bietola in modo ecocompatibile convinti che, in tempi più o meno lunghi, la tradizionale depurazione calco-carbonica dovrà essere eliminata.

Bibliografia

- [1] A. Bottino *et al.*, *Chimica e Industria*, 2001, **83**(7), 63.
- [2] P.W. van der Poel *et al.*, *Sugar Technology. Beet and Cane Sugar Manufacture*, Verlag Dr. Albert Bartens KG (Ed.), Berlin, 1998.
- [3] G. Vaccari, *Ind. Alim. Agr.*, 1996, **113**, 525.
- [4] Copernicus Project - Contratto ERBC 15-CT96-0734: "Minimisation of energy and water use in sugar production by clean technology based on cooling crystallization of concentrated raw juice - Suclean".
- [5] Piani Finalizzati Murst: 1. Processo innovativo ed integrato per la produzione dello zucchero; 2. Interventi migliorativi sul processo di produzione dello zucchero.
- [6] G. Vaccari *et al.*, *Zuckerindustrie*, 1993, **118**, 780.
- [7] G. Vaccari *et al.*, *Zuckerindustrie*, 1996, **121**, 802.
- [8] G. Vallini *et al.*, *EP* 96105418.6-2114, 1996.
- [9] G. Vaccari *et al.*, *Zuckerindustrie*, 1999, **124**, 947.
- [10] G. Vaccari *et al.*, *Zuckerindustrie*, 2002, **127**, 22.
- [11] M. Grabowski *et al.*, *Applied Thermal Engineering*, 2001, **21**, 1319.
- [12] *EP* 99108020.1-2114, 1999.
- [13] G. Vaccari *et al.*, *Zuckerindustrie*, 2001, **126**, 619.