

Prefazione

Dopo il volume *Ingegneria dell'industria alimentare*, pubblicato nel 2013, l'autore propone il nuovo testo *Ingegneria dell'industria agroalimentare* in due volumi. Il presente volume, il primo, è costituito da 9 capitoli, ripresi dai primi nove del precedente volume unico, ma con vari interventi di aggiornamento e completamento. I relativi temi trattati, sempre in relazione ai prodotti alimentari e alla loro trasformazione, sono: la reologia, il trasporto dei fluidi, l'estrazione per pressione, la decantazione, la centrifugazione, la flottazione, la filtrazione, la microfiltrazione, l'ultrafiltrazione, la nanofiltrazione, l'osmosi inversa, l'elettrodialisi, la trasmissione del calore, la pastorizzazione, la sterilizzazione e la concentrazione per evaporazione.

Lo scopo dell'industria alimentare è la trasformazione dei prodotti agricoli in cibo, tramite l'impiego di macchine e impianti secondo una sequenza che va decisa con la logica della massima qualità e sicurezza a costi competitivi.

Parlare di sequenza, vuol dire fare riferimento a distinti stadi della trasformazione, ognuno dei quali costituisce una operazione unitaria. Risulta palese che l'intera trasformazione, alle condizioni di massimo rapporto qualità/costi, si traduce nella necessità di ottimizzare ogni singola operazione unitaria.

Per il raggiungimento di obiettivi di questa portata, al tecnologo alimentare non basta conoscere meramente il funzionamento e l'operatività della singola macchina o impianto collegati all'operazione. Se ottimizzare vuol dire saper quantificare, occorre avere gli *strumenti* per una calcolazione della macchina/impianto in rapporto ai fenomeni di interazione della stessa con il prodotto in elaborazione al suo interno.

Per inciso, la macchina/impianto deve anche essere costruita per resistere alle sollecitazioni meccaniche, termiche e chimiche, ma questo è compito degli uffici tecnici dei costruttori e non può quindi essere oggetto di studio in questa sede.

Gli *strumenti* di cui sopra non possono che essere le modellazioni matematiche, le uniche che offrono la possibilità di analizzare i fenomeni in modo quantitativo.

I modelli matematici, quelli che nel linguaggio comune sono chiamati la “teoria”, non possono essere troppo elementari altrimenti producono risultati lontani dalla realtà e quindi non servono a nulla. Non possono nemmeno essere troppo complessi, perché rendono prima di tutto molto faticoso il loro apprendimento e poi richiedono tempi e potenze di calcolo dei PC che tecnologi e industrie alimentari non possono permettersi: nei fatti quindi risultano inapplicabili.

Nelle pagine che seguono il lettore troverà, dunque, per ogni operazione unitaria, oltre alla descrizione ricca di schemi del funzionamento e dell’operatività della macchina/impianto, anche una adeguata modellazione matematica, giusto compromesso tra i due estremi citati prima.

Non si tratta di formule ed equazioni piovute dal cielo. Il filo conduttore di ogni singola pagina è quello di non dire nulla che non sia stato spiegato in precedenza. Ogni nuova informazione, descrittiva, fisica o matematica, si viene così a stratificare su ciò che è stato già consolidato nelle pagine precedenti e i dovuti approfondimenti, attraverso le interpretazioni fisiche, fanno sempre costante riferimento alla cornice dei principi generali.

L’intendimento è quello che il lettore, alla fine dell’argomento, possa dire: “Ah, ma allora così è!”. È proprio questa impostazione didattica che rende possibile uno studio proficuo del testo anche a chi non ha una precedente solida preparazione fisico-matematica.

Oltre alla logicità nello sviluppo didattico degli argomenti, si segnala la presenza nel testo di ulteriori informazioni, presenti in appendici ai capitoli, e di molti dati, in grafici e tabelle, di utilità pratica per chi già opera nell’industria, sia come tecnologo alimentare che come ingegnere.

Nella consapevolezza che anche in questo nuovo testo non mancheranno sviste ed errori, sarò grato a chi li segnalerà. Infine un vivo ringraziamento alla Cleup per l’alta qualità del lavoro di impaginazione, composizione e stampa di questo primo volume.

Padova, agosto 2017

L’Autore

Indice generale

Prefazione

V

INGEGNERIA DELL'INDUSTRIA AGROALIMENTARE

1. MECCANICA DEI SOLIDI E DEI FLUIDI ALIMENTARI

1.1	Reologia dei prodotti alimentari	3
1.1.1	<i>Elementi distintivi dei solidi e dei fluidi liquidi e gassosi</i>	3
1.1.2	<i>Sforzi normali e tangenziali</i>	4
1.1.3	<i>Caratteristiche reologiche dei solidi elastici e plastici</i>	5
1.1.4	<i>Caratteristiche reologiche dei fluidi</i>	9
1.1.4.1	Fluidi newtoniani. Viscosità	9
1.1.4.2	Fluidi non newtoniani	15
1.1.4.2.1	Pseudoplastici	15
1.1.4.2.2	Plastici di Bingham	18
1.1.4.2.3	Plastici di Herschel-Bulkley	19
1.1.4.2.4	Plastici di Casson	20
1.1.4.2.5	Dilatanti	20
1.1.4.2.6	Equazioni di Cross e Carreau	21
1.1.5	<i>Influenza della temperatura sulla reologia dei fluidi</i>	23
1.1.6	<i>Influenza della concentrazione sulla reologia dei fluidi</i>	24
1.1.7	<i>Influenza del tempo. Fluidi tixotropici e antitixotropici</i>	25
1.1.8	<i>Comportamenti reologici complessi</i>	26
1.1.8.1	Deformazione ritardata (creep)	26
1.1.8.1.1	Modello viscoelastico di Kelvin-Voigt	27
1.1.8.1.2	Modello viscoelastico di Maxwell	27
1.1.8.1.3	Modello viscoplastico	28
1.1.8.2	Rilassamento	28
1.1.8.3	Recupero	28
1.1.9	<i>Misura delle proprietà reologiche. Viscosimetri e reometri</i>	32
1.1.9.1	Viscosimetro/reometro a capillare	32
1.1.9.1.1	Fluidi newtoniani	34
1.1.9.1.2	Fluidi pseudoplastici e dilatanti	36

	1.1.9.1.3	Fluidi plastici di Bingham	39
	1.1.9.1.4	Fluidi plastici di Herschel-Bulkley	42
1.1.9.2		Applicazione numerica	42
1.1.9.3		Applicazione numerica	43
1.1.9.4		Applicazione numerica	44
1.1.9.5		Applicazione numerica	44
1.1.9.6		Viscosimetro/reometro rotativo a cilindri coassiali	45
	1.1.9.6.1	Fluidi newtoniani	48
	1.1.9.6.2	Fluidi pseudoplastici e dilatanti	49
	1.1.9.6.3	Fluidi plastici di Bingham	50
1.1.9.7		Viscosimetro/reometro rotativo a piatto e cono	51
	1.1.9.7.1	Oscillazione del cono per la misura del comportamento viscoelastico	52
1.1.9.8		Misure empiriche delle proprietà viscoelastiche	59
	1.1.9.8.1	Farinografo	59
	1.1.9.8.2	Alveografo	61
	1.1.9.8.3	Estensografo	62
2. TRASPORTO DEI FLUIDI			
2.1		Trasporto dei fluidi alimentari nelle tubazioni	63
	2.1.1	<i>Richiami sul comportamento reologico dei fluidi alimentari</i>	64
	2.1.2	<i>Instabilità del moto laminare. Moto turbolento. Numero di Reynolds</i>	65
	2.1.2.1	Fluidi newtoniani	65
		2.1.2.1.1 Numeri di Reynolds critici	66
		2.1.2.1.2 Profilo di velocità nei moti laminare e turbolento	67
		2.1.2.1.3 Tubi con sezioni non circolari	69
	2.1.2.2	Fluidi non newtoniani	69
		2.1.2.2.1 Fluidi pseudoplastici e plastici di Herschel-Bulkley	69
		2.1.2.2.2 Fluidi plastici di Bingham	71
	2.1.3	<i>Principio di continuità (o di conservazione della massa)</i>	71
	2.1.4	<i>Principio di conservazione dell'energia meccanica. Equazione di Bernoulli per fluidi perfetti</i>	73
	2.1.5	<i>Equazione di Bernoulli per fluidi reali</i>	74
		2.1.5.1 Caso particolare dell'applicazione dell'equazione di Bernoulli	76
		2.1.5.2 L'equazione di Bernoulli applicata ad un impianto di trasporto	77
	2.1.6	<i>Determinazione delle perdite di carico nelle tubazioni di trasporto</i>	79
		2.1.6.1 Perdite di carico distribuite	79
		2.1.6.1.1 Fattore d'attrito di Darcy per fluidi newtoniani e pseudoplastici in moto laminare	81

	2.1.6.1.2	Fattore d'attrito di Darcy per fluidi plastici di Bingham e di Herschel-Bulkley in moto laminare	82
	2.1.6.1.3	Fattore d'attrito di Darcy per fluidi newtoniani in moto turbolento	83
	2.1.6.2	Perdite di carico concentrate	85
2.1.7		<i>Applicazione dell'equazione di Bernoulli al trasporto di fluidi alimentari</i>	87
	2.1.7.1	Applicazione numerica	87
	2.1.7.2	Applicazione numerica	89
	2.1.7.3	Applicazione numerica	92
2.2		Pompe per fluidi alimentari	95
	2.2.1	<i>Pompe volumetriche alternative</i>	95
	2.2.1.1	Pompe a stantuffi	96
	2.2.1.2	Pompe a membrana	100
	2.2.2	<i>Pompe volumetriche rotative</i>	102
	2.2.2.1	Pompe a palette con rotore eccentrico	102
	2.2.2.2	Pompe con rotore flessibile	103
	2.2.2.3	Pompe ad ingranaggi e a lobi	104
	2.2.2.4	Pompe monovite	105
	2.2.2.5	Pompe peristaltiche	107
	2.2.2.6	Potenza richiesta e curva caratteristica delle pompe volumetriche	108
	2.2.3	<i>Pompe centrifughe</i>	109
	2.2.3.1	Cenni sulla teoria delle pompe centrifughe	111
	2.2.3.2	Potenza richiesta e curva caratteristica delle pompe centrifughe	115
	2.2.3.3	Cavitazione	118
	2.2.3.3.1	Applicazione numerica	122
	2.2.3.3.2	Applicazione numerica	122
		Appendice al capitolo 2	
	A.2.3.1	Sul fattore d'attrito di Darcy per fluidi newtoniani in moto laminare	124
	A.2.3.2	Sul fattore d'attrito di Darcy e sul numero di Reynolds per fluidi pseudoplastici in moto laminare	125
	A.2.3.3	Sul fattore d'attrito di Darcy per fluidi plastici di Bingham in moto laminare	126
	A.2.3.4	Sul Principio di conservazione dell'energia meccanica e sull'equazione di Bernoulli	127
3.		ESTRAZIONE MECCANICA SOLIDO-LIQUIDO	
	3.1	Fattori influenti sull'estrazione meccanica. Resa di estrazione	131
	3.1.1	<i>Preparazione della materia prima</i>	132
	3.1.2	<i>Pressione e tempo</i>	132
	3.1.3	<i>Spessore dello strato di prodotto</i>	136

3.2	Macchine per l'estrazione meccanica. Presse	136
3.2.1	<i>Presse a vite</i>	136
3.2.2	<i>Presse a nastri</i>	138
3.2.3	<i>Presse a polmone</i>	140
	3.2.3.1 Varianti costruttive	143
3.2.4	<i>Presse a pistone a comando idraulico</i>	144
4.	DECANTAZIONE, CENTRIFUGAZIONE E FLOTTAZIONE	
4.1	Sedimentazione	147
4.1.1	<i>Equazione di Stokes nella decantazione</i>	147
4.1.2	<i>Limiti dell'equazione di Stokes</i>	150
4.1.3	<i>Applicazione numerica</i>	151
4.1.4	<i>Applicazione numerica</i>	152
4.1.5	<i>Applicazione numerica</i>	152
4.2	Sedimentatori statici	153
4.3	Centrifugazione	157
4.3.1	<i>Sedimentatori centrifughi</i>	159
4.3.2	<i>Decanter</i>	159
	4.3.2.1 Area equivalente del decanter	161
	4.3.2.2 Applicazione numerica	164
4.3.3	<i>Centrifughe a dischi</i>	166
	4.3.3.1 Scarico dei fanghi	168
	4.3.3.2 Area equivalente della centrifuga a dischi	170
4.4	Separatori centrifughi liquido-liquido	171
4.5	Flottazione	172
4.5.1	<i>Introduzione</i>	172
4.5.2	<i>Principi della flottazione</i>	173
4.5.3	<i>Funzionamento dell'impianto di flottazione</i>	174
4.5.4	<i>Dimensionamento del flottatore</i>	176
	Appendice al capitolo 4	
A.4.6	<i>Proposta di una equazione unica per la velocità di sedimentazione in sospensioni diluite</i>	180
	A.4.6.1 Introduzione	180
	A.4.6.2 Analisi dimensionale del fenomeno di separazione	181
	A.4.6.3 Indicazioni sperimentali	183
	A.4.6.4 Nuova equazione unica per la velocità di sedimentazione	185
	A.4.6.5 Applicazione numerica	186
A.4.7	<i>Sull'area equivalente</i>	186
	A.4.7.1 Sull'area equivalente del decanter	186
	A.4.7.2 Sull'area equivalente della centrifuga a dischi	188
5.	FILTRAZIONE	
5.1	Introduzione	191
5.2	Tipi di filtrazione e relativi meccanismi di ritenzione dei solidi	192
5.2.1	<i>Filtrazione di superficie</i>	192

	5.2.2	<i>Filtrazione di profondità</i>	193	
5.3		Tipi di setti filtranti	194	
5.4		Operazioni di filtrazione in rapporto alle dimensioni delle particelle	195	
5.5		Filtrazione con prepanello e alluvionaggio	197	
	5.5.1	<i>Preparazione della sospensione per il prepanello</i>	197	
	5.5.2	<i>Preparazione del prepanello</i>	198	
	5.5.3	<i>Preparazione della sospensione per l'alluvionaggio</i>	199	
	5.5.4	<i>Filtrazione con l'alluvionaggio</i>	199	
5.6		Teoria della filtrazione a prepanello ed alluvionaggio	200	
	5.6.1	<i>Equazione di Darcy della filtrazione</i>	200	
	5.6.2	<i>Ipotesi di invarianza della pressione Δp per l'impiego di pompa centrifuga</i>	201	
	5.6.3	<i>Sviluppi dall'equazione di Darcy</i>	203	
	5.6.4	<i>Dimensionamento del filtro con Δp costante nella filtrazione a prepanello ed alluvionaggio</i>	208	
		5.6.4.1	Applicazione numerica	210
		5.6.4.2	Applicazione numerica	210
5.7		Materiali coadiuvanti di filtrazione	210	
	5.7.1	<i>Farina fossile</i>	211	
	5.7.2	<i>Perlite</i>	212	
	5.7.3	<i>Cellulosa</i>	213	
5.8		Filtri	213	
	5.8.1	<i>Filtri-prensa</i>	214	
		5.8.1.1	Filtri-prensa a piastre e telai	214
		5.8.1.2	Filtri-prensa a sole piastre	216
	5.8.2	<i>Filtri a camera di pressione a piatti</i>	218	
	5.8.3	<i>Filtri a camera di pressione a dischi</i>	221	
	5.8.4	<i>Filtri a camera di pressione a candele</i>	222	
	5.8.5	<i>Filtri in depressione a tamburo rotante</i>	225	
		Appendice al capitolo 5		
	A.5.9	<i>Filtrazione a prepanello ed alluvionaggio con pompa volumetrica</i>	231	
		A.5.9.1	Filtrazione a portata costante	231
		A.5.9.2	Applicazione numerica	232
		A.5.9.3	Filtrazione in parte a portata costante e in parte a pressione costante	233
		A.5.9.4	Applicazione numerica	233
	A.5.10	<i>Filtrazione a prepanello ed alluvionaggio con pompa centrifuga a Δp variabile</i>	235	
		A.5.10.1	Curva caratteristica reale di una pompa centrifuga commerciale	235
		A.5.10.2	Integrazione dell'equazione di Darcy con Δp variabile secondo la curva caratteristica reale della pompa centrifuga	238

	A.5.10.3 Dimensionamento del filtro con pompa centrifuga a Δp variabile nella filtrazione a prepanello ed alluvionaggio	239
	A.5.10.4 Applicazione numerica	240
6.	OPERAZIONI DI SEPARAZIONE CON MEMBRANE	
6.1	Microfiltrazione frontale (dead-end)	244
	6.1.1 <i>Configurazioni geometriche delle membrane per la MF frontale</i>	245
6.2	Microfiltrazione tangenziale (MFT)	249
	6.2.1 <i>Impianti per MFT</i>	249
	6.2.2 <i>Membrane per MFT</i>	252
	6.2.3 <i>Equazione della portata di permeato nella MFT</i>	253
	6.2.3.1 Applicazione numerica	254
	6.2.4 <i>Configurazioni geometriche delle membrane per la MFT</i>	254
	6.2.4.1 Confronto tra le diverse configurazioni delle membrane da MFT	257
6.3	Ultrafiltrazione UF	258
	6.3.1 <i>Membrane e configurazioni per UF</i>	258
	6.3.2 <i>Equazione della portata di permeato nella UF</i>	259
	6.3.2.1 Applicazione numerica	260
	6.3.3 <i>Il fenomeno della concentrazione per polarizzazione</i>	260
	6.3.3.1 Studio della concentrazione per polarizzazione	260
	6.3.4 <i>Influenza della pressione e della portata di ricircolo</i>	264
	6.3.5 <i>Impianti per UF</i>	265
	6.3.5.1 Impianti discontinui	265
	6.3.5.2 Impianti discontinui con anello chiuso di ricircolo	266
	6.3.5.3 Impianti continui ad uno stadio	268
	6.3.5.3.1 Confronto tra impianti discontinui e continui ad uno stadio	269
	6.3.5.4 Impianti continui pluristadio	270
6.4	Osmosi inversa OI	271
	6.4.1 <i>Membrane, configurazioni e impianti per OI</i>	271
	6.4.2 <i>Osmosi e osmosi inversa</i>	274
	6.4.3 <i>Valutazione della pressione osmotica</i>	275
	6.4.3.1 Applicazione numerica	277
	6.4.4 <i>Equazione della portata di permeato, concentrazione per polarizzazione e coefficiente di ritenzione in OI</i>	277
	6.4.4.1 Applicazione numerica	279
6.5	Nanofiltrazione	280
	6.5.1 <i>Applicazione numerica</i>	280
6.6	Elettrodialisi	281
	6.6.1 <i>Membrane per elettrodialisi</i>	282
	6.6.2 <i>Tasso di deionizzazione e legge della portata di soluzione trattata</i>	282
	6.6.3 <i>Impianti per elettrodialisi</i>	283

Appendice al capitolo 6

A.6.7	<i>Sul calcolo dell'area delle membrane per impianti continui di UF</i>	285
A.6.7.1	Applicazione numerica	287
A.6.7.2	Applicazione numerica	288

7. TRASMISSIONE DI CALORE

7.1	Trasmissione di calore in regime stazionario	292
7.1.1	<i>Trasmissione di calore per conduzione</i>	292
7.1.2	<i>Trasmissione di calore per convezione forzata</i>	294
7.1.3	<i>Determinazione del coefficiente di convezione forzata</i>	295
7.1.3.1	Fluidi newtoniani in moto turbolento dentro tubazioni	298
7.1.3.2	Fluidi newtoniani in regime laminare dentro tubazioni	299
7.1.3.3	Fluidi pseudoplastici in regime laminare dentro tubazioni	300
7.1.3.4	Fluidi newtoniani in regime turbolento all'esterno di solidi	300
7.1.3.5	Fluidi newtoniani in regime laminare all'esterno di solidi	300
7.1.3.6	Fluidi in cambiamento di fase	300
7.1.3.7	Fluidi condensanti	301
7.1.3.8	Fluidi in ebollizione	302
7.1.4	<i>Trasporto di calore per convezione naturale</i>	303
7.1.4.1	Pareti verticali piane e cilindriche in regime laminare e turbolento	305
7.1.4.2	Superfici cilindriche orizzontali in regime laminare e turbolento	305
7.1.4.3	Superfici piane orizzontali	306
7.1.5	<i>Scambio termico globale con pareti piane</i>	306
7.1.6	<i>Calcolo del salto termico medio ($T_{fa} - T_{fs}$)</i>	309
7.1.7	<i>Calcolo del flusso termico q</i>	311
7.1.8	<i>La portata e le temperature del fluido di servizio</i>	312
7.2	Trasmissione di calore in regime non stazionario	314
7.2.1	<i>Evoluzione della temperatura al cuore del prodotto con $Bi < 0,1$</i>	316
7.2.1.1	Applicazione numerica	317
7.2.2	<i>Evoluzione della temperatura al cuore del prodotto con $Bi > 40$</i>	318
7.2.2.1	Applicazione numerica	321
7.2.3	<i>Evoluzione della temperatura al cuore del prodotto con $0,1 < Bi < 40$</i>	322
7.2.4	<i>Profili di temperatura al cuore del prodotto al variare di Bi</i>	323
7.3	Proprietà termofisiche	324
7.3.1	<i>Conducibilità termica</i>	324
7.3.1.1	Conducibilità termica nei prodotti alimentari	325
7.3.2	<i>Calore specifico dei prodotti alimentari</i>	326
7.3.3	<i>Densità dei prodotti alimentari</i>	327
7.3.4	<i>Diffusività termica dei prodotti alimentari</i>	327

7.4	Scambiatori di calore	332
7.4.1	<i>Scambiatori a tubi concentrici</i>	333
	7.4.1.1 Applicazione numerica	334
7.4.2	<i>Scambiatori a fascio tubiero</i>	337
	7.4.2.1 Calcolo dei coefficienti di convezione	339
7.4.3	<i>Scambiatori di calore a spirale</i>	340
7.4.4	<i>Scambiatori di calore a superficie raschiata</i>	341
	7.4.4.1 Calcolo dei coefficienti di convezione	343
	7.4.4.2 Applicazione numerica	343
7.4.5	<i>Scambiatori di calore a piastre</i>	347
	7.4.5.1 Tipi di assemblaggi degli scambiatori a piastre	349
	7.4.5.2 Calcolo dei coefficienti di convezione	351
Appendice al capitolo 7		
A.7.5.1	Conduzione in pareti cilindriche	352
A.7.5.2	Analisi dimensionale del fenomeno di convezione forzata	353
A.7.5.3	Coefficiente di scambio termico globale con pareti cilindriche	356
A.7.5.4	La differenza media logaritmica delle temperature e il fattore di temperatura	356
A.7.5.5	Efficienza di scambio termico	360
A.7.5.6	Applicazione numerica	364
8.	TRATTAMENTI TERMICI	
8.1	Cinetiche dei trattamenti termici: distruzione microbica, alterazione costituenti e cottura	368
8.1.1	<i>Cinetica di distruzione microbica a temperatura costante</i>	368
8.1.2	<i>Influenza della temperatura sulla cinetica di distruzione microbica</i>	370
8.1.3	<i>Numero di riduzioni decimali n e tempo di trattamento</i>	371
	8.1.3.1 Applicazione numerica	374
8.1.4	<i>Cinetica di alterazione dei costituenti a temperatura costante nella sterilizzazione</i>	375
8.1.5	<i>Scottatura e cottura</i>	378
8.1.6	<i>Pastorizzazione</i>	380
8.1.7	<i>Trattamenti termici a temperatura variabile di prodotti pompabili</i>	381
	8.1.7.1 Applicazione numerica	384
8.1.8	<i>Trattamenti termici a temperatura variabile di prodotti confezionati</i>	385
	8.1.8.1 Metodo Generale di Bigelow	388
	8.1.8.2 Applicazione numerica	389
	8.1.8.3 Metodo della Formula di Ball	390
	8.1.8.4 Modello matematico di Ball	395
	8.1.8.5 Metodo della Formula e contributo di Stumbo	397
	8.1.8.6 Applicazione numerica	399

8.2	Pastorizzatori e sterilizzatori	403
8.2.1	<i>Pastorizzatori e sterilizzatori per prodotti pompabili con scambio termico indiretto</i>	403
8.2.1.1	Impianti senza recupero	403
8.2.1.2	Pastorizzatori con recupero	404
8.2.1.3	Efficienza di recupero termico	405
8.2.1.4	Sterilizzatori con recupero	406
8.2.2	<i>Sterilizzatori per prodotti pompabili con scambio termico diretto</i>	407
8.2.2.1	Sostatore, morte termica e danno termico	410
8.2.3	<i>Pastorizzatori a tunnel dei prodotti confezionati</i>	416
8.2.4	<i>Sterilizzatori dei prodotti confezionati</i>	417
8.2.4.1	Impianti discontinui in autoclave	417
8.2.4.2	Impianti discontinui <i>Steriflow</i>	420
8.2.4.3	Impianti continui <i>Sterilmatic</i>	421
8.2.4.4	Impianti continui idrostatici	425
Appendice al capitolo 8		
A.8.2.5	Analisi costi benefici per gli impianti di pastorizzazione di prodotti pompabili con scambio termico indiretto e recupero	428
A.8.2.5.1	Il consumo e il costo unitario dell'energia rispetto all'efficienza	428
A.8.2.5.2	L'area degli scambiatori e il costo unitario dell'impianto rispetto all'efficienza	429
A.8.2.5.3	Analisi costi-benefici	431
9.	CONCENTRAZIONE PER EVAPORAZIONE	
9.1	L'evaporatore a semplice effetto	439
9.1.1	<i>Il flusso di prodotto alimentare negli evaporatori a semplice effetto</i>	441
9.1.1.1	Evaporatori a flusso ascendente e a circolazione naturale	441
9.1.1.2	Evaporatori a flusso ascendente a circolazione forzata	443
9.1.1.3	Evaporatori a flusso discendente (o a film cadente)	446
9.1.2	<i>Criteri di dimensionamento dell'evaporatore a semplice effetto</i>	447
9.1.2.1	Temperatura di condensazione del vapore vivo	449
9.1.2.2	Temperatura di evaporazione del fluido alimentare	449
9.1.2.3	Trasmittanza <i>K</i> negli evaporatori	453
9.1.2.4	Portata di vapore vivo	454
9.1.3	<i>Il consumo specifico dell'evaporatore a semplice effetto</i>	455
9.1.4	<i>Condensazione del vapore alimentare e riduzione della temperatura di ebollizione</i>	455
9.1.4.1	Dimensionamento del condensatore	459
9.1.5	<i>Torri di raffreddamento</i>	460
9.1.6	<i>Applicazione numerica</i>	462
9.1.7	<i>Applicazione numerica</i>	464

9.2	Sistemi per ridurre il consumo di energia nella evaporazione	466
9.2.1	<i>Evaporatore a 2 effetti</i>	466
9.2.2	<i>Evaporatore a 3 effetti</i>	469
9.2.3	<i>Evaporatore a multiplo effetto</i>	473
9.2.4	<i>Dimensionamento di un evaporatore a multiplo effetto</i>	474
9.2.4.1	Metodo iterativo per il dimensionamento ad area costante	478
9.2.5	<i>Applicazione numerica</i>	479
9.2.6	<i>Applicazione numerica</i>	481
9.2.7	<i>Evaporatore a semplice effetto con termocompressore</i>	483
9.2.7.1	Modello matematico del termocompressore	484
9.2.7.2	Funzionamento dell'evaporatore con termocompressore	487
9.2.8	<i>Evaporatore a semplice effetto con compressore meccanico</i>	489
9.2.8.1	Modello matematico del compressore meccanico	490
9.2.8.2	Consumo specifico dell'evaporatore con compressore meccanico	491
Appendice al capitolo 9		
A.9.3	<i>Evaporatore a piastre</i>	493
A.9.4	<i>Evaporatori rotativi a film agitato</i>	493
A.9.5	<i>Cenni di termodinamica</i>	495
A.9.5.1	Primo principio della termodinamica	495
A.9.5.2	Equazione di stato e gas ideale	498
A.9.5.3	Calori specifici e relazione di Mayer	499
A.9.5.4	Processi termodinamici	501
A.9.5.5	Adiabatica dell'espansione e della compressione nell'eiettore	502
A.9.5.6	Adiabatica della compressione con compressore meccanico	505
Bibliografia essenziale		507
Indice analitico		509
Appendice		
Sistemi di unità di misura di uso corrente		519
Tabelle di conversione		523
<i>Unità di lunghezza x</i>		523
<i>Unità di massa m</i>		523
<i>Unità di forza F</i>		523
<i>Unità di intervallo di temperatura ΔT</i>		523
<i>Unità di energia E</i>		524
<i>Unità di potenza P</i>		524