

Prefazione

Dopo il volume *Ingegneria dell'industria alimentare*, pubblicato nel 2013 e rapidamente esaurito, l'autore propone il nuovo testo *Ingegneria dell'industria agroalimentare* in due volumi.

Nel volume I, stampato nel settembre 2017, sono stati affrontati temi quali: la reologia dei prodotti alimentari, il trasporto dei fluidi alimentari, l'estrazione per pressione, la decantazione, la centrifugazione, la flottazione, la filtrazione, la microfiltrazione, l'ultrafiltrazione, la nanofiltrazione, l'osmosi inversa, la trasmissione del calore, la pastorizzazione, la sterilizzazione e la concentrazione per evaporazione. Essi sono stati raggruppati in 9 capitoli, ripresi dai primi nove del precedente volume unico, ma con alcuni interventi di aggiornamento e completamento.

Questo secondo volume ha invece visto il totale rifacimento dei capitoli che, nel volume unico del 2013, erano dal decimo in poi. Necessità scaturita sia per uniformarli all'approccio didattico scelto già per la stesura dei primi 9 capitoli del volume I, sia per aggiornarli e arricchirli.

I temi qui trattati sono: la termodinamica dell'aria umida in rapporto ai prodotti alimentari, l'essiccazione, la refrigerazione, il congelamento e surgelazione, la cristallizzazione, l'estrazione con solvente e la distillazione.

In continuità con l'approccio adottato nel primo volume, anche questi argomenti vengono proposti in un contesto applicativo senza però perdere di vista il giusto rigore della descrizione fisica e matematica, sia del funzionamento delle macchine e degli impianti, che della loro interazione con il prodotto in trasformazione.

A questo proposito, gli argomenti corrispondono a *operazioni unitarie* che vengono svolte da una macchina o da un impianto. Il tecnologo, dopo aver studiato il prodotto alimentare in termini di "ricetta industriale", deve assemblare le operazioni nella sequenza più opportuna per realizzare il *processo produttivo*. Quindi, il *tecnologo alimentare*, quale progettista del processo, ha bisogno di

una conoscenza delle macchine e degli impianti che vada oltre la descrizione elementare del loro funzionamento. Di qui la proposta di modellazioni matematiche alla portata del percorso formativo della sua figura professionale, in grado di consentirgli un'indagine quantitativa dei fenomeni intercorrenti fra il prodotto e la macchina o l'impianto.

Tuttavia il volume, come peraltro il primo, è anche corredato da approfondimenti, relativi a criteri di dimensionamento e a dati sui prodotti, di pratica utilità ai progettisti delle macchine e degli impianti, cioè ai tecnici e agli ingegneri.

Nella certezza che anche in questo nuovo testo non mancheranno sviste ed errori, sarò grato a coloro che si spenderanno nel segnalarli. Infine un duplice doveroso ringraziamento: alla tecnologa alimentare Federica Tono, per la fattiva collaborazione e i preziosi suggerimenti; alla Casa Editrice per il meritorio impegno nel lavoro di impaginazione, stampa e diffusione di questo secondo volume.

Padova, marzo 2018

L'Autore

Indice generale

Prefazione	V
INGEGNERIA DELL'INDUSTRIA AGROALIMENTARE	
1. TERMODINAMICA DELL'ARIA UMIDA	
1.1 Introduzione	3
1.2 Gas ideali e loro miscele	3
1.2.1 <i>Pressione assoluta e relativa</i>	3
1.2.2 <i>Legge di Dalton</i>	4
1.3 Vapore d'acqua saturo	5
1.4 Tensione di vapore dell'acqua	7
1.5 Aria umida	9
1.5.1 <i>Generalità</i>	9
1.5.2 <i>Pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria</i>	9
1.5.3 <i>Umidità relativa dell'aria</i>	10
1.6 Trasporto di materia e fenomeno dell'evaporazione dell'acqua in aria atmosferica	10
1.6.1 <i>Diffusione di materia e prima legge di Fick</i>	11
1.6.2 <i>Esempio di evaporazione con diffusione del vapore in aria</i>	12
1.6.3 <i>Evaporazione dell'acqua in atmosfera d'aria in movimento</i>	14
1.6.4 <i>Fenomeno dell'evaporazione quando l'acqua e l'aria hanno la temperatura differente</i>	16
1.6.5 <i>Fenomeno dell'evaporazione quando l'acqua e l'aria hanno la stessa temperatura</i>	17
1.7 Temperatura a bulbo umido e la saturazione adiabatica dell'aria	19
1.7.1 <i>Temperatura a bulbo umido</i>	19
1.7.2 <i>Saturatore adiabatico</i>	22
1.7.3 <i>Saturazione adiabatica è una trasformazione isoentalpica</i>	24
1.7.4 <i>Dal saturatore adiabatico all'essiccatoio</i>	26
1.8 Altre importanti grandezze della termodinamica dell'aria umida	28
1.8.1 <i>Umidità specifica</i>	28

1.8.2	<i>Temperatura di rugiada</i>	29
1.8.3	<i>Diagrammi psicrometrici</i>	31
1.8.4	<i>Trasformazioni dell'aria durante l'essiccazione</i>	35
1.9	Evaporazione ed ebollizione	38
1.9.1	<i>Comparazione tra evaporazione ed ebollizione</i>	39
1.9.2	<i>Uso dei termini evaporazione ed ebollizione</i>	39
1.10	Applicazioni numeriche	40
1.10.1	<i>Applicazione numerica n. 1</i>	40
1.10.2	<i>Applicazione numerica n. 2</i>	41
1.10.3	<i>Applicazione numerica n. 3</i>	42
2.	L'ESSICCAZIONE IN CORRENTE D'ARIA	
2.1	Generalità sull'essiccazione	47
2.2	Umidità dei prodotti alimentari	48
2.2.1	<i>Umidità su base secca e umidità su base umida: quale impiegare e relazioni tra le due</i>	48
2.3	La velocità di essiccazione	49
2.4	Modalità di essiccazione	50
2.5	Essiccazione con aria a temperatura costante	51
2.5.1	<i>Fasi del processo di essiccazione. Umidità critica</i>	52
2.5.1.1	<i>Periodo a velocità costante</i>	53
2.5.1.2	<i>Periodo a velocità decrescente</i>	54
2.5.1.3	<i>Umidità di equilibrio</i>	54
2.5.2	<i>Parametri termodinamici nelle due fasi dell'essiccazione</i>	55
2.5.3	<i>Velocità di essiccazione e tempo di essiccazione</i>	57
2.5.3.1	<i>Calcolo della velocità di essiccazione del periodo a velocità costante</i>	57
2.5.3.2	<i>Fattore di forma F</i>	59
2.5.3.3	<i>Calcolo del tempo di essiccazione nel periodo a velocità costante</i>	60
2.5.3.4	<i>Calcolo del tempo di essiccazione nel periodo a velocità decrescente</i>	61
2.6	Umidità di equilibrio e attività dell'acqua	62
2.6.1	<i>Parametri influenti l'umidità di equilibrio</i>	62
2.6.2	<i>Diagrammi per la determinazione dell'umidità di equilibrio. Isteresi</i>	63
2.6.3	<i>Attività dell'acqua</i>	65
2.6.4	<i>Descrizione matematica delle curve di disidratazione $a_w = f(X_E, T)$</i>	69
2.7	Essiccazione negli essiccatoi continui (aria a temperatura variabile)	69
2.7.1	<i>Prodotto in essiccazione con umidità sempre superiore a quella critica</i>	70
2.7.1.1	<i>Dimensionamento degli essiccatoi continui con $X_F > X_C$</i>	73
	<i>Portata d'acqua evaporata e umidità finale</i>	73
	<i>Portata di prodotto umido</i>	74
	<i>Lunghezza dell'essiccatoio</i>	74

	Temperature iniziale e finale dell'aria essiccante	75
	Coefficiente di convezione e portata di aria essiccante	76
	Portata di aria essiccante tramite il diagramma psicrometrico	77
	Controllo dei parametri dell'essiccatoio	79
2.7.1.2	Essiccatoio continuo e velocità di essiccazione con $X_F > X_C$	80
2.7.2	<i>Prodotto con umidità finale inferiore a quella critica $X_F < X_C$</i>	85
	Lunghezza del primo tratto dell'essiccatoio L_C	86
	Temperatura dell'aria T_{AC} al punto L_C	86
	Lunghezza del secondo tratto dell'essiccatoio $L_{TOT}-L_C$	89
2.8	Essiccazione negli essiccatoi discontinui (tipo a silo)	91
2.8.1	<i>Velocità di essiccazione</i>	92
2.8.2	<i>Tempo di essiccazione</i>	94
2.9	Tipologie di essiccatoi in corrente d'aria	95
2.9.1	<i>Riciclo dell'aria</i>	95
2.9.2	<i>Essiccatoio a silo</i>	96
2.9.3	<i>Essiccatoi ad armadio con ripiani</i>	98
2.9.4	<i>Essiccatoi a tunnel</i>	99
2.9.5	<i>Essiccatoi a nastro</i>	100
2.9.6	<i>Essiccatoi a tamburo rotante</i>	101
2.9.7	<i>Essiccatoi a letto fluido</i>	102
2.9.8	<i>Essiccatoi pneumatici</i>	104
2.9.9	<i>Spray dryers</i>	105
	2.9.9.1 Generalità	105
	2.9.9.2 Atomizzatori	106
	2.9.9.2.1 Atomizzatori a turbina	106
	2.9.9.2.2 Atomizzatori a spruzzatore a pressione	108
	2.9.9.2.3 Atomizzatori pneumatici	109
	2.9.9.3 Camera di essiccazione	110
2.10	Limiti dell'essiccazione in corrente d'aria	112
2.11	Liofilizzazione (crioessiccazione)	112
2.11.1	<i>Sublimazione</i>	112
2.11.2	<i>Termodinamica della liofilizzazione</i>	114
2.11.3	<i>Fasi della liofilizzazione</i>	116
	2.11.3.1 Fase di congelamento	117
	2.11.3.2 Fase di essiccazione primaria	117
	2.11.3.3 Fase di essiccazione secondaria (fase di desorbimento)	118
	2.11.3.4 Considerazioni relative alle fasi della liofilizzazione	118
2.11.4	<i>Limiti della liofilizzazione</i>	120
2.12	Applicazioni numeriche	121
	<i>Applicazione numerica n. 1</i>	121
	<i>Applicazione numerica n. 2</i>	124
	<i>Applicazione numerica n. 3</i>	125

3. REFRIGERAZIONE E MACCHINE FRIGORIFERE	
3.1 Refrigerazione	127
3.1.1 <i>Sistema evaporatore-condensatore</i>	128
3.1.2 <i>Macchina frigorifera a compressione di vapore</i>	130
3.1.2.1 <i>Ciclo frigorifero</i>	132
3.1.2.2 <i>Fluidi frigoriferi</i>	133
3.1.3 <i>Sorgenti a bassa ed alta temperatura e bilancio energetico</i>	134
3.2 Efficienza frigorifera (COP) e potenza frigorifera (q_E)	135
3.2.1 <i>Ciclo teorico di Carnot e ciclo pratico</i>	137
3.2.2 <i>Variazione del COP rispetto alle temperature</i>	141
3.3 Generalità sulla macchina frigorifera a compressione di vapore	141
3.4 Evaporatore e sorgente a bassa temperatura	143
3.5 Condensatore e sorgente ad alta temperatura	147
3.6 Compressori	148
3.6.1 <i>Compressori volumetrici</i>	149
3.6.1.1 <i>Compressore volumetrico a pistoncini</i>	149
3.6.1.2 <i>Compressore volumetrico a vite</i>	150
3.6.1.3 <i>Compressore a spirale orbitante (scroll)</i>	152
3.6.2 <i>Compressori centrifughi</i>	153
3.7 Valvola di laminazione	154
3.7.1 <i>Valvola di laminazione a galleggiante (alimentazione allagata)</i>	155
3.7.2 <i>Valvola termostatica (alimentazione ad espansione secca)</i>	157
3.8 Caratteristiche dei fluidi frigoriferi	160
3.8.1 <i>Ammoniaca</i>	161
3.8.2 <i>Freon</i>	162
3.9 Applicazioni numeriche	163
<i>Applicazione numerica n. 1</i>	163
<i>Applicazione numerica n. 2</i>	163
Appendice al capitolo 3	165
A.3.10 Macchine frigorifere ad assorbimento	165
A.3.10.1 <i>Principio di funzionamento</i>	165
A.3.10.2 <i>Macchine frigorifere ad assorbimento ad acqua e bromuro di litio</i>	169
A.3.10.3 <i>Macchine frigorifere ad assorbimento ad ammoniaca e acqua</i>	171
A.3.11 Macchine frigorifere con ciclo a gas	173
A.3.11.1 <i>Premessa</i>	173
A.3.11.2 <i>Principio di funzionamento</i>	173
4. CONGELAMENTO	
4.1 Congelamento nell'industria alimentare	181
4.2 Congelamento dell'acqua e delle soluzioni acquose	182
4.2.1 <i>Generalità</i>	182
4.2.2 <i>Congelamento dell'acqua pura</i>	182
4.2.3 <i>Congelamento delle soluzioni acquose con punto eutettico</i>	183

4.2.4	<i>Soluzioni acquose con concentrazione inferiore a quella eutettica: calcolo della frazione di acqua non congelata</i>	185
4.3	Congelamento dei prodotti alimentari	186
4.3.1	<i>Generalità</i>	186
4.3.2	<i>Congelamento di un prodotto alimentare: temperatura iniziale di congelamento</i>	187
4.3.3	<i>Massa molecolare equivalente della materia solida di un prodotto alimentare</i>	187
4.3.4	<i>Congelamento di un prodotto alimentare: calcolo della frazione di acqua non congelata</i>	188
4.4	Calcolo del tempo di congelamento	188
4.4.1	<i>Modelli matematici</i>	188
4.4.2	<i>Modello di Plank</i>	189
4.4.2.1	<i>Ipotesi del modello di Plank</i>	189
4.4.2.2	<i>Modello matematico della teoria di Plank e calcolo del tempo di congelamento</i>	191
4.4.2.3	<i>I coefficienti di forma P e R</i>	193
4.4.3	<i>Modello di Nagaoka</i>	194
4.4.3.1	<i>Calcolo del tempo di congelamento</i>	194
4.4.3.2	<i>Calcolo della differenza di entalpia specifica Δh</i>	196
4.5	Caratteri fisici dei prodotti alimentari sottoposti a congelamento	196
4.5.1	<i>Generalità</i>	196
4.5.2	<i>Calcolo della densità ρ</i>	199
4.5.3	<i>Calcolo del calore specifico c</i>	199
4.5.4	<i>Calcolo della conducibilità termica λ</i>	199
4.6	Impianti per il congelamento	200
4.6.1	<i>Congelatori discontinui</i>	200
4.6.1.1	<i>Congelatori ad aria (discontinui)</i>	200
4.6.1.2	<i>Congelatori a contatto (discontinui)</i>	201
4.6.2	<i>Congelatori continui</i>	203
4.6.2.1	<i>Congelatori ad aria (continui)</i>	203
4.6.2.2	<i>Congelatori a letto fluido (continui)</i>	204
4.6.2.3	<i>Congelatori a contatto (continui)</i>	205
4.6.3	<i>Congelatori a gas criogenici</i>	206
4.7	Applicazioni numeriche	208
	<i>Applicazione numerica n. 1</i>	208
	<i>Applicazione numerica n. 2</i>	209
	<i>Applicazione numerica n. 3</i>	210
	<i>Applicazione numerica n. 4</i>	217
	<i>Applicazione numerica n. 5</i>	218
	<i>Applicazione numerica n. 6</i>	219
5.	LA CRISTALLIZZAZIONE	
5.1	Cristallizzazione in campo alimentare	221
5.2	Concentrazione delle soluzioni	221

5.2.1	<i>Generalità</i>	221
5.2.2	<i>Concentrazione percentuale massa su massa riferita al solvente</i>	222
5.2.3	<i>Concentrazione percentuale massa su massa riferita alla soluzione</i>	222
5.2.4	<i>Relazioni tra concentrazioni espresse diversamente</i>	222
5.3	Solubilità e sovrasaturazione	223
5.3.1	<i>Generalità</i>	223
5.3.2	<i>Solubilità</i>	224
5.3.3	<i>Sovrasaturazione</i>	225
5.4	Le curve di saturazione e sovrasaturazione	225
5.5	Fasi dell'operazione di cristallizzazione	227
5.5.1	<i>Generalità</i>	227
5.5.2	<i>Prima fase: la nucleazione</i>	227
5.5.2.1	La nucleazione primaria	227
5.5.2.2	La nucleazione secondaria	228
5.5.2.3	Il tempo di induzione e la velocità di nucleazione	228
5.5.3	<i>Seconda fase: l'accrescimento dei cristalli</i>	229
5.5.3.1	La fase diffusiva	229
5.5.3.2	La fase di deposizione	230
5.5.3.3	La velocità di accrescimento del cristallo	230
5.6	Gli impianti di cristallizzazione	231
5.6.1	<i>Generalità</i>	231
5.6.2	<i>Cristallizzatori a raffreddamento</i>	231
5.6.2.1	Cristallizzatore discontinuo in assenza di agitazione	231
5.6.2.2	Cristallizzatore discontinuo in presenza di agitazione	232
5.6.2.3	Cristallizzatore a superficie raschiata	232
5.6.3	<i>Cristallizzatori a evaporazione</i>	233
5.6.3.1	Cristallizzatore sottovuoto	233
5.6.3.2	Cristallizzatore Oslo	237
5.7	Applicazioni numeriche	239
	<i>Applicazione numerica n. 1</i>	239
	<i>Applicazione numerica n. 2</i>	242
	<i>Applicazione numerica n. 3</i>	244
	Appendice al capitolo 5	247
A.5.8	<i>Il fenomeno del flash-cooling (flash-evaporazione o raffreddamento adiabatico)</i>	247
6.	ESTRAZIONE SOLIDO-LIQUIDO MEDIANTE SOLVENTE	
6.1	Estrazione solido-liquido nell'industria alimentare	251
6.2	Principi fisici alla base dell'estrazione solido-liquido	252
6.3	Estrattore discontinuo a singolo stadio	252
6.3.1	<i>Principio di funzionamento</i>	252
6.3.2	<i>Simbologia: definizioni e significati</i>	254
6.3.3	<i>Relazioni fondamentali</i>	255

6.3.4	<i>Resa di estrazione η</i>	256
6.3.5	<i>Bilancio di massa nell'estrattore a singolo stadio</i>	257
6.3.5.1	<i>Ipotesi fondamentali</i>	257
6.3.5.2	<i>Casi di risoluzione</i>	258
6.3.5.3	<i>Risoluzione con F e S noti</i>	258
6.3.5.4	<i>Risoluzione con F e η noti</i>	259
6.3.5.5	<i>Quantità minima di solvente impiegabile</i>	260
6.3.5.6	<i>Relazione tra resa e quantità di solvente impiegato</i>	261
6.4	Estrattore discontinuo a esaurimento a stadi multipli	262
6.4.1	<i>Principio di funzionamento</i>	262
6.4.2	<i>Simbologia: definizioni e significati</i>	264
6.4.3	<i>Ipotesi fondamentali</i>	264
6.4.4	<i>Relazioni fondamentali</i>	264
6.4.5	<i>Risoluzione del bilancio di massa</i>	265
6.5	Estrattore discontinuo a stadi multipli in controcorrente	266
6.5.1	<i>Generalità</i>	266
6.5.2	<i>Simbologia, principio di funzionamento e ipotesi</i>	267
6.5.3	<i>Quantità note al momento della definizione del processo</i>	268
6.5.4	<i>Risoluzione del bilancio di massa</i>	269
6.5.4.1	<i>Determinazione della soluzione imbibente W_i uscente dallo stadio i-esimo</i>	269
6.5.4.2	<i>Determinazione dell'estratto E_i uscente dallo stadio i-esimo</i>	269
6.5.4.3	<i>Determinazione della concentrazione di soluto nella fase liquida x_{Zi} uscente dallo stadio i-esimo</i>	270
6.5.5	<i>Metodo iterativo per il calcolo del numero di stadi dell'estrattore</i>	271
6.5.6	<i>Metodo diretto per il calcolo del numero di stadi dell'estrattore</i>	272
6.5.6.1	<i>Dimostrazione della relazione per il calcolo del numero degli stadi in un estrattore in controcorrente tramite metodo diretto</i>	274
6.5.7	<i>Aspetti pratici dell'estrazione a multiplo stadio in controcorrente</i>	276
6.6	L'estrattore continuo	277
6.6.1	<i>Processo continuo e regime stazionario</i>	277
6.6.2	<i>Processo discontinuo (a batch) e regime non stazionario</i>	278
6.6.3	<i>Ipotesi fondamentali relative all'estrattore continuo</i>	278
6.7	Impianti di estrazione solido-liquido mediante solvente	279
6.7.1	<i>Generalità</i>	279
6.7.2	<i>Estrattori a immersione</i>	280
6.7.2.1	<i>Estrattori a immersione discontinui</i>	280
6.7.2.2	<i>Estrattori a immersione continui</i>	282
6.7.3	<i>Estrattori a percolazione</i>	283
6.7.3.1	<i>Percolatori a singolo stadio</i>	283
6.7.3.2	<i>Percolatori a stadi multipli</i>	284

	6.7.3.3	Percolatore rotante	285
	6.7.3.4	Percolatore a tappeto forato	287
6.8	Fluidi supercritici		288
	6.8.1	<i>Generalità</i>	288
	6.8.2	<i>Passaggi dallo stato di liquido a quello di gas: trasformazioni termodinamiche</i>	289
	6.8.3	<i>Stati subcritici e supercritici: confronto tra trasformazioni termodinamiche</i>	294
6.9	Estrazione mediante fluidi supercritici		295
	6.9.1	<i>Impianti di estrazione che utilizzano fluidi supercritici</i>	296
	6.9.1.1	Componenti dell'estrattore-separatore	296
	6.9.1.2	Funzionamento dell'estrattore-separatore	297
6.10	Applicazioni numeriche		299
		<i>Applicazione numerica n. 1</i>	299
		<i>Applicazione numerica n. 2</i>	302
		<i>Applicazione numerica n. 3</i>	303
		<i>Applicazione numerica n. 4</i>	305
		<i>Applicazione numerica n. 5</i>	306
7.	DISTILLAZIONE		
7.1	Miscela ideali e non ideali di due liquidi		309
	7.1.1	<i>Miscela ideale di due liquidi: tensione di vapore a temperatura costante</i>	309
	7.1.2	<i>Miscela ideale di due liquidi: temperatura di ebollizione a pressione costante</i>	310
	7.1.3	<i>Miscela ideale di due liquidi: composizione del vapore saturo</i>	311
	7.1.4	<i>Diagramma di equilibrio a pressione costante per le miscele ideali e non ideali di due liquidi</i>	313
7.2	Distillazione frazionata		315
	7.2.1	<i>Generalità sulla distillazione frazionata in campo alimentare</i>	316
	7.2.2	<i>Tipologie di apparecchiature per la distillazione frazionata</i>	316
	7.2.2.1	Sistema evaporatore-condensatore a singolo stadio	316
	7.2.2.2	Sistema evaporatore-condensatore a stadi multipli	319
	7.2.2.3	Sistema evaporatore-condensatore a stadi multipli con riflusso	320
	7.2.2.4	Tronchi di esaurimento e di arricchimento	321
7.3	Distillazione in colonne a piatti		323
	7.3.1	<i>Principio di funzionamento</i>	323
	7.3.2	<i>Struttura della colonna a piatti</i>	326
7.4	Simbologia per la colonna di distillazione a piatti		329
7.5	Flussi molari in ingresso (F) e in uscita (D, W) relativi alla colonna di distillazione		331
	7.5.1	<i>Relazioni fondamentali</i>	331
	7.5.2	<i>Rapporto di riflusso</i>	332
	7.5.3	<i>Flusso in ingresso F</i>	332

	Condizioni per $q = 1$	333
	Condizioni per $q = 0$	333
	Condizioni per $0 < q < 1$	334
	Condizioni per $q > 1$	334
	Condizioni per $q < 0$	334
7.6	Ipotesi relativa ai calori latenti molari di evaporazione	334
7.7	Flussi molari di vapore V e di liquido L nel piatto <i>i-esimo</i>	335
	7.7.1 <i>Generalità</i>	335
	7.7.2 <i>Costanza dei flussi molari di liquido L e di vapore V relativi al piatto <i>i-esimo</i></i>	336
	7.7.3 <i>Flussi di vapore V nei tronchi di arricchimento ed esaurimento</i>	337
	7.7.4 <i>Flussi di liquido L nei tronchi di arricchimento ed esaurimento</i>	339
	7.7.5 <i>Relazione che legano V_D con V_W e L_D con L_W</i>	339
	7.7.6 <i>Altre relazioni tra i flussi di vapore V e i flussi di liquido L</i>	341
7.8	Relazioni che legano le frazioni molari dei flussi di vapore e di liquido	343
	7.8.1 <i>Relazioni tra le frazioni molari del liquido in un piatto e quelle del vapore che da esso promana</i>	343
	7.8.2 <i>Relazioni tra le frazioni molari del liquido in un piatto e quelle del vapore che promana dal piatto sottostante</i>	343
	7.8.2.1 <i>Caso del tronco di arricchimento.</i>	344
	<i>Retta di arricchimento o di lavoro superiore</i>	
	7.8.2.2 <i>Caso del tronco di esaurimento. Retta di esaurimento o di lavoro inferiore</i>	345
	7.8.2.3 <i>Retta di arricchimento e di esaurimento: punto di intersezione e linea q</i>	347
7.9	Composizione del liquido e del vapore nei piatti dei tronchi di arricchimento ed esaurimento	349
	7.9.1 <i>Metodo analitico per la determinazione della composizione dei fluidi presenti nei piatti</i>	350
	7.9.1.1 <i>Caso del tronco di arricchimento</i>	350
	7.9.1.2 <i>Caso del tronco di esaurimento</i>	351
	7.9.2 <i>Metodo grafico per la per la determinazione della composizione dei fluidi presenti nei piatti</i>	351
	7.9.2.1 <i>Caso del tronco di arricchimento</i>	351
	7.9.2.2 <i>Caso del tronco di esaurimento</i>	353
7.10	Metodo McCabe - Thiele per la determinazione del numero teorico di piatti nella colonna di distillazione	354
	7.10.1 <i>Parametri noti della colonna di distillazione</i>	354
	7.10.1.1 <i>Determinazione delle condizioni di alimentazione (parametro q)</i>	355
	7.10.1.2 <i>Scelta del valore di R, rapporto di riflusso</i>	355
	7.10.2 <i>Calcolo del numero teorico dei piatti della colonna di distillazione</i>	356
	7.10.2.1 <i>Generalità</i>	356
	7.10.2.2 <i>Procedura di calcolo</i>	357

7.11 Applicazioni numeriche	359
<i>Applicazione numerica n. 1</i>	359
1 ^a parte: calcoli preliminari	360
2 ^a parte: applicazione del metodo McCabe - Thiele	361
Appendice al capitolo 7	366
A.7.12 <i>Relazioni che legano frazioni molari x e frazioni in massa x^*</i>	366
A.7.13 <i>Uso del diagramma di equilibrio: modelli matematici</i>	368
Esempio n. 1	371
Esempio n. 2	371
Bibliografia essenziale	373
Indice analitico	375
Appendice	
Sistemi di unità di misura di uso corrente	381
Tabelle di conversione	385
<i>Unità di lunghezza x</i>	385
<i>Unità di massa m</i>	385
<i>Unità di forza F</i>	385
<i>Unità di intervallo di temperatura ΔT</i>	385
<i>Unità di energia E</i>	386
<i>Unità di potenza P</i>	386