



# 14. GAIA

## LIKIDO-LIKIDO OREKA ETA ERAUZKETA

GAI HAU IKASTEAN GAITASUN HAUEK LORTU BEHARKO DITUZU:

1. Diagrama cartesiarrak eta triangelu-diagramak erabili.
2. Banatze-koefizienteen kurba lortu.
3. Erauzketarako ekipoa diseinatu.
4. Banatze-zuzenak interpolatu.
5. Korrante gurutzatuko sistemak ebatzi.
6. Kontrakorronteko sistemak ebatzi.
7. Guztiz nahastezinak diren nahasteen erauzketa ebatzi.

Erauzketarekin, jatorrizko nahastearekin partzialki disolbaezina den disolbatzaile likidoaz kontaktuan jarriz bereizten dira likido-egoerako nahasteko osagaiak (solutua). Solutua bigarren likidoan disolbatzeko prozesua, propietate fisikoen desberdintasunean baino gehiago, desberdintasun kimikoan oinarritzen den eragiketa da. Kontaktuan jarri ondoren, dentsitate-desberdintasunagatik bereizten dira bi faseak. Bereiztea eraginkorra izan dadin aukeratu behar den disolbatzaileak solutuarentzako afinitate handiagoa izan behar du. Erauzketa burutu ondoren, destilazioan ez bezala konposatu berri bat gehitu zaionez, solutua eta disolbatzailea bereizi behar dira. Likido-likido eragiketen aplikazio industrialaren adibide gisa, hauek aipa daitezke: propano likidoarekin arrainen gibelego oliotik A eta D bitaminak erauztea, HF erabiliz *p*-xilenoa erauztea *o*-xilenoak eta *m*-xilenoak osatutako nahastetik, eta bentzenoz amonio sulfato disoluziotik kaprolaktama erauztea.

### 14.1 LIKIDO-LIKIDO OREKA

Fase biko sistema orekan badago, bi faseetako tenperaturak eta presioak berdinak izateaz gainera, bi faseetako potentzial kimikoek berdinak izan behar dute:

$$\mu_i^I = \mu_i^{II} \quad (14.1)$$

Ekuzio hori garatzean, aktibitate-koefizienteen eta mol-frakzioen funtziora murrizten da, eta likido-likido orekan baldintza hau betetzen da osagai bakoitzarentzat:

$$(\gamma_i \cdot x_i)^I = (\gamma_i \cdot x_i)^{II} \quad (14.2)$$

### 14.2 NAHASTE HIRUTARREN KONPOSIZIOA IRUDIKATZEKO DIAGRAMAK

Likido-likido erauzketak eta sistemen orekak triangelu-diagrametan zein diagrama cartesiarrean irudika daitezke.

Likido-likido erauzketaren kasurik sinpleenak hiru konposatu likido dauzka (nahaste hirutarra). Bereizi nahi den nahastea solutuaz (C) eta diluitzaileaz (A) osatuta dago (elkar guztiz disolbagarriak direnez, biak fase bakarrean daude). Nahaste horri disolbatzailea (B) gehitzen zaio, jatorrizko fasearekin partzialki nahastezina dena. Ondorioz, bi fase sortzen dira; bata, A osagaitan aberatsa den fase Findua (hemendik aurrera *R*) eta bestea, disolbatzailetan aberatsa den fase Erauzia (hemendik aurrera *E*). C solutua bi faseetan banatzen da, A eta B osagaietan daukan disolbagarritasun handiagatik.

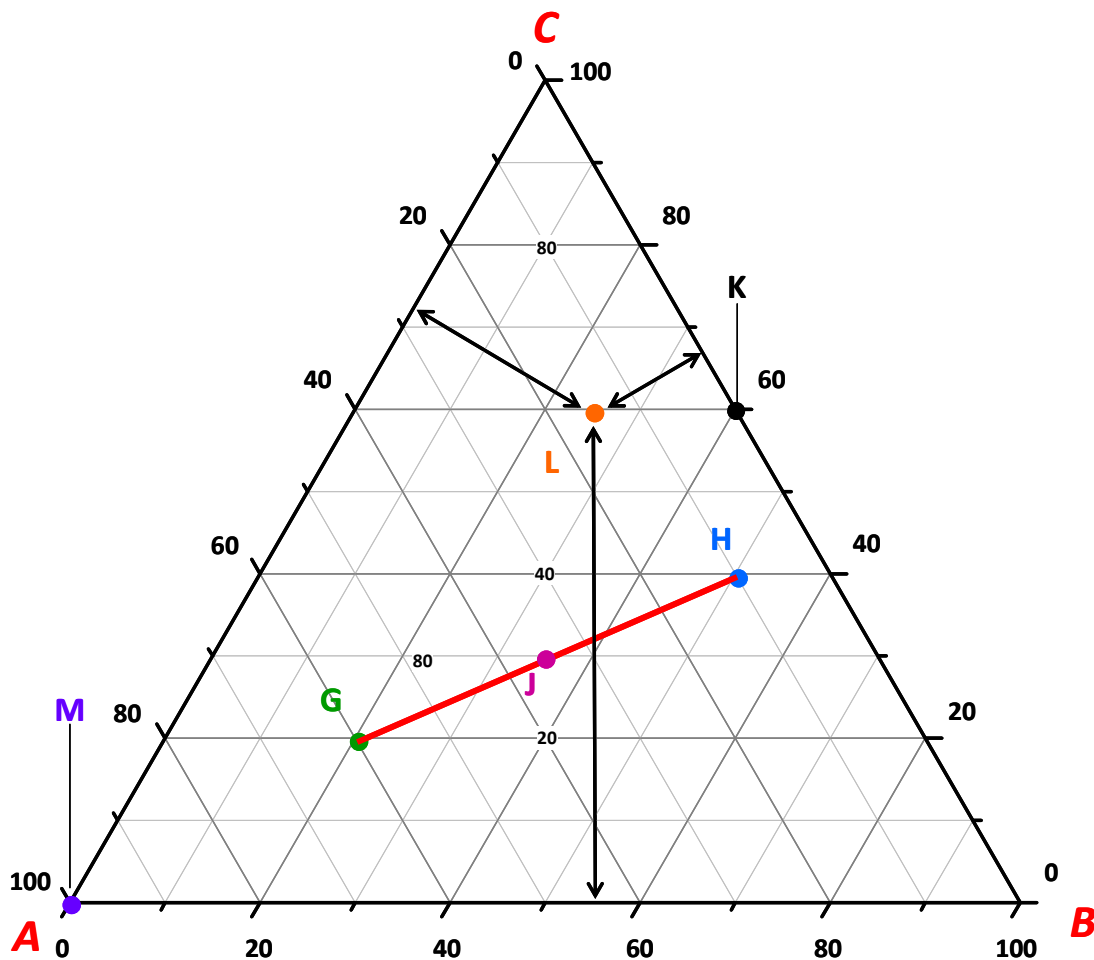
#### 14.2.1 Triangelu-diagramak

Diagrama triangelu aldeberdin batean marrazten da. Erpin bakoitzean osagai bat irudikatzen da. Diagrama horren propietateak hauek dira, eta 14.1 irudian agertzen dira:

- Masa erako ehunekoak adierazten dira.
- Diagramako erpin bakoitzak erpin horretan irudikatutako osagaiaren % 100 adierazi nahi du (M puntuak % 100 A osagaiaz osatutako nahastea adierazten du).
- Diagramako ertz bakoitzak bi erpinetan irudikatutako osagaien nahaste bitarrak adierazten ditu. (Adibidez, K puntuak Bren % 40 eta Cren % 60 den nahastea adierazten du).
- Diagrama barruko puntuak hiru osagaien nahastea adierazten du.

- Osagai bakoitzaren ehunekoak osagaiaren erpinaren kontrako ertzetik abiatuz kalkulatzen da. Adibidez, L puntuak % 60 C (AB ertzetik hasita hirurogeigarren lerroa da, C erpinerantz mugituz), % 25 B (CA ertzetik hasita, B erpinerantzko hamargarren lerroa da) eta % 15 A dauka.
- G konposizioiko nahaste bati H konposizioiko nahastea gehitzen bazaio, nahaste erresultantea (J) GH lerroaren gaineko punturen batean kokatzen da, nahasten diren emarien arabera. Era berean, G konposizioiko nahaste bati J konposizioiko nahastea kentzen bazaio, nahaste erresultantea GJ lerro zuzenaren luzapenean kokatzen da (*palankaren erregela*).

$$G(\text{kg}) \cdot \overline{GJ} = H(\text{kg}) \cdot \overline{JH}^1 \quad (14.3)$$



14.1 irudia. Triangelu-diagrama.

Hala, G konposizioiko 100 kg eta H konposizioiko 100 kg nahasten badira, J nahaste erresultanteak 200 kg dauzka, honela: 60 kg C, 70 kg A eta 70 kg. Beraz, Jren konposizioa % 30 C, % 35 A eta % 35 B da.

#### 14.2.2 Diagrama cartesiarrak

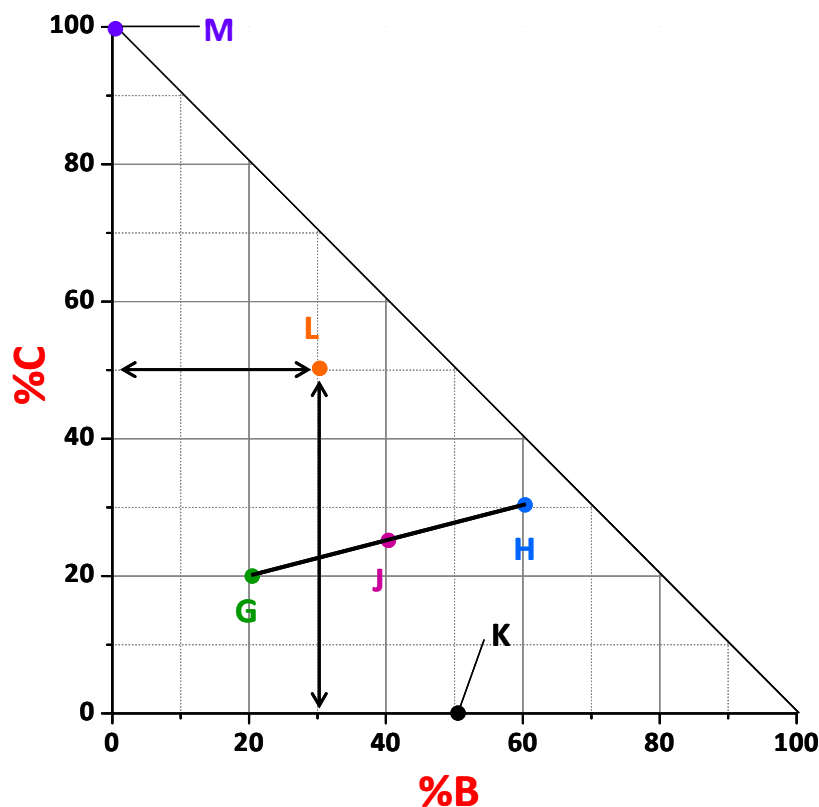
Nahaste hirutarrean hiru osagaien ehunekoak baturak ehun izan behar duenez, hiru osagaietatik biren ehunekoak definitzen badira, hirugarrenarena finkatuta gelditzen da. Horregatik, diagrama cartesiarra erabil daiteke, bi osagaien ehunekoak irudikatuz bakarrik.

<sup>1</sup> Emariak balira, masa/denbora erabiliko litzateke.

Solutua (C) ordenatuen ardatzean eta disolbatzailea (B) abzisen ardatzean irudikatzea da ohikoena.

Diagrama honen propietateak, triangelu-diagramarenak bezalakoak dira, salbuespen hauekin:

- Ordenatuan, Cren ehunekoa adierazten da (M puntuak % 100 C den nahastea adierazten du); abszisan, berriz, Bren ehunekoa adierazten da. Ordenatuko puntuak ez daukate Brik, A eta Cren nahasteak dira; abszisako puntuak, berriz, ez daukate Crik (A eta Bren nahasteak dira).
- Diagramako ertz bakoitzak ertzak biltzen dituen erpinetan irudikatutako osagaien nahaste bitarra adierazten du. (Adibidez, K puntuak % 50 B eta % 50 A den nahastea adierazten du).
- C eta Bren ehunekoak diagraman irakurtzen dira. A osagaiaren ehunekoa  $100 - (\% C + \% B)$  da. Adibidez, L puntuko konposizioa % 50 C, % 30 B eta % 20 A da.
- G konposizioko nahaste bati H konposizioko nahastea gehitzen bazaio, nahaste erresultantea (J) GH lerroaren gaineko punturen batean kokatzen da, nahasten diren emarien arabera. Era berean, G konposizioko nahaste bati J konposizioko nahastea kentzen bazaio, nahaste erresultantea GJ lerro zuzenaren luzapenean kokatzen da (*palankaren-erregela*).



14.2 irudia. Diagrama cartesiarra.

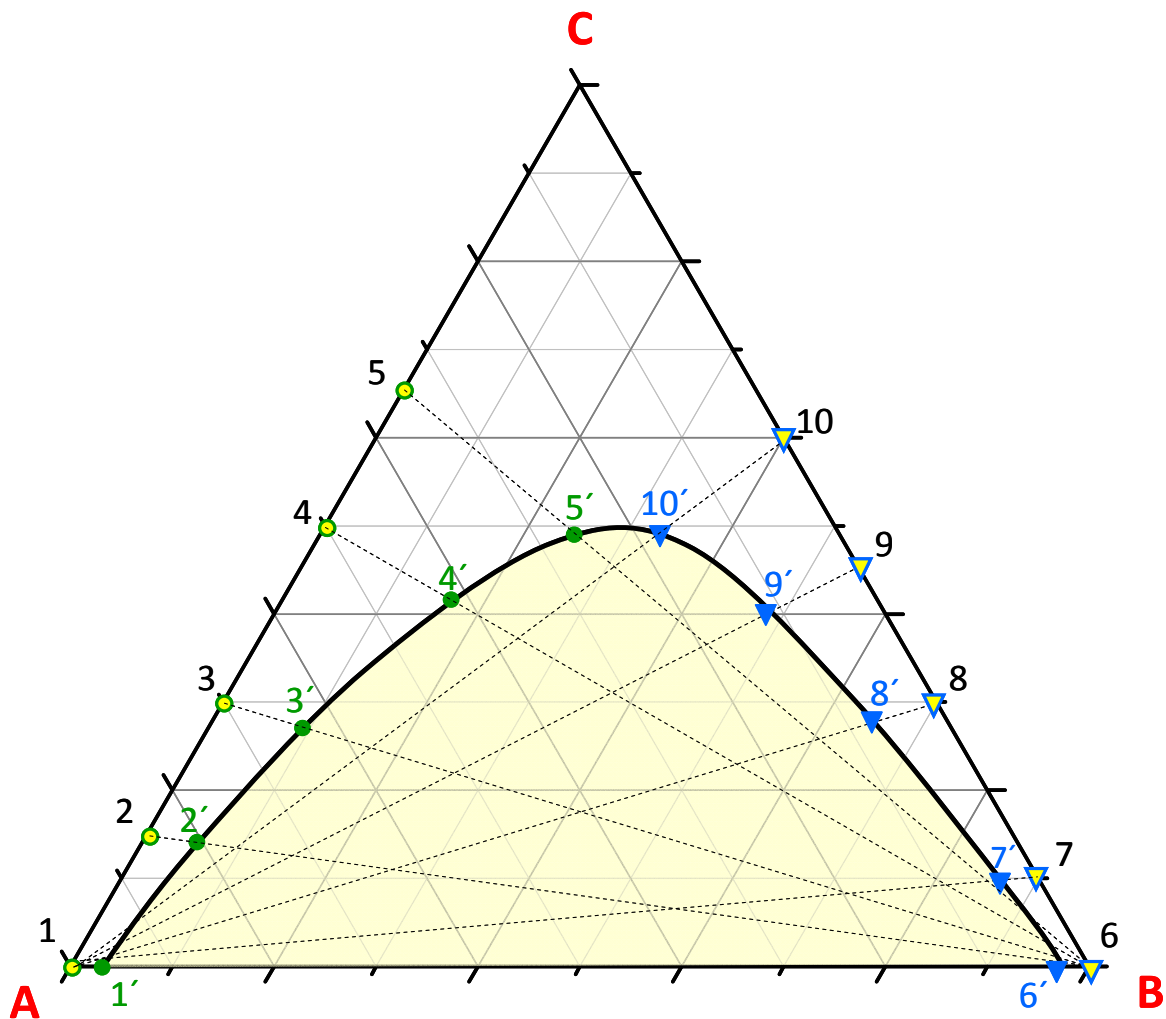
### 14.3 DISOLBAGARRITASUN-EREMUAREN LORPEN ESPERIMENTALA

Likido-likido erauzketa egiteko, bi fase nahastezin sortu behar direnez, hiru osagaiak daudeneko disolbagarritasun-eremuak eta orekak definituta egon behar dute. A, B eta C hiru osagaiz osatutako nahaste batean, hiru bikotetatik bi guztiz disolbagarriak badira (har

ditzagun C-A eta C-B bikoteak guztiz disolbagarriak direla) eta bat bakarria disolbagaitza bada (A-B bikotea disolbagaitza), disolbagarritasun-eremuaren (asetze-kurba) lorpen esperimentalak, lausotze-puntuaren metodoaz lor daiteke.

Konposizio desberdineko A eta Cren nahaste bitarretatik abiatuz, irabiatzen diren bitartean, B osagaia gehitzen zaie tantaz tanta, nahastea gardena izatetik lausotzen hasten den arte; une horretan, nahastea disolbagarria izatetik disolbagaitza izateko puntua lortzen da. Modu berean, B eta Cren nahaste bitarrei A gehitzen zaie, lausotu arte. Hala lortutako puntuen leku geometrikoak disolbagarritasun-eremua definitzen du (ikusi 14.3 irudia).

1, 2, 3, 4 eta 5 nahastei B osagaia gehitzean, nahaste bakoitzaren konposizioaren puntua Bren erpinerantz hurbilduz doa; 1', 2', 3', 4' eta 5' puntuak lausotasuna lortu direnekoak dira; bakoitzari B gehiago gehituko bagenio, bi fase sortuko liriateke. Modu berean, 6, 7, 8, 9 eta 10 puntuak adierazten duten nahastei A osagaia gehitzean gune lausoa agertzean 6', 7', 8', 9' eta 10' puntuak lortzen dira. 1'-2'-3'-4'-5'-10'-9'-8'-7'-6' lerroak disolbagarritasun-eremua definitzen du; eremu barruko nahasteak disolbagaitzak dira, eta orekan dauden bi fasetan banatzen da. Eremutik kanpoko nahasteak fase bakarrean egon daitezke. 14.3 irudian, disolbagaitzak direneko eremua ilundutako azalera adierazten du.



14.3 irudia. Disolbagarritasun eremuaren lorpen esperimentalak.

Disolbagarritasun-eremua tenperaturarekin aldatzen denez, tenperatura konstantean eraiki behar da diagrama. Tenperatura igotzean, osagaiak elkarren disolbagarriagoak direnez,

disolbagarritasun-eremua txikiago bihurtzen da (hau da, disolbagarriak direneko eremua zabalagoa da). Laneko presioa altuegia ez bada (<50 atm), presioak ez du eragiten disolbagarritasun-eremuaren azaleran.

### 14.3.1 Banatze-zuzenaren eta banatze-kurbaren lorpen esperimentalak

Disolbagarritasun-eremu barruko nahasteak orekan dauden bi fasetan banatzen dira. A osagaian (diluitzailean) aberatsa den faseari **findu** deritzo (hemendik aurrera, *R* hizkiak adieraziko da); B osagaian (disolbatzailean) aberatsa den faseari **erauzia** deritzo (aurrerantzean, *E* hizkiak adieraziko da). **Oreka-lerroak edo banatze-zuzenak** fase finduko eta fase erauziko konposizioak batzen dituen lerro zuzenak dira. Ezaugarri hauek dituzte:

- Lerro zuzenak dira.
- Ez dute elkar gurutzatzen.
- Edozein malda izan dezakete; positiboa, negatiboa, zero, eta aldakorra sistema berean.
- Fase finduko (*R*) eta fase erauziko (*E*) konposizioak lotzen ditu.

Nahaste hirutar bakoitzak bere banatze-zuzenak dauzka, esperimentalki lortu beharrekoak (ez dago nahasteen banatze-zuzenak aurreikusteko lege edo adierazpenik). A, B eta C osagaien osatutako hirukote bakoitzerako hainbat nahaste disolbagaitz prestatzen dira banatze-inbutuetan, eta oso ongi nahasten dira (hiru osagaien arteko kontaktu sakona bermatzeko) (14.4(a) irudiko 1, 2, 3 eta 4 nahasteak); ondoren, geldirik uzten dira denbora luzez, bi faseak orekaren arabera bereizi daitezten. Kontuan izan bi faseen dentsitateak desberdinak direla: fase astunena inbutuaren behealdean dago, eta haren gainean fase arinena metatuz doa. Behin oreka lortuta (luzaroan atsedenean utzi ondoren), fase bakoitzeko laginak analizatzen dira osagai bakoitzaren ehunekoak kalkulatzeko. Hala, C solutuak fase finduan eta fase erauzian dituen masa-ehunekoei  $x_{R,C}$  eta  $y_{E,C}$  deitzen zaie. 1 puntua *R1* fasean eta berarekin orekan dagoen *E1* fasean banatu da. Hala, *R1-E1* lerro zuzena banatze-zuzena da; berdin gertatzen da beste nahasteekin.

Efektu praktikoetarako, sistema bakoitzarentzat banatze-zuzen batzuk baino ez dira lortzen. Esperimentalki lortutako banatze-zuzenekin banatze-kurba eraikitzen da, eta esperimentalki lortu ez diren banatze-zuzenak interpolatzeko erabiltzen da.

Fase erauzian solutuak duen konposizioaren eta fase horrekin orekan dagoen fase finduan solutuak duen konposizioaren arteko erlazioari **banatze-koefiziente** ( $K_C$ ) deritzo, eta solutuak bi likidoekiko duen afinitatearen adierazlea da:

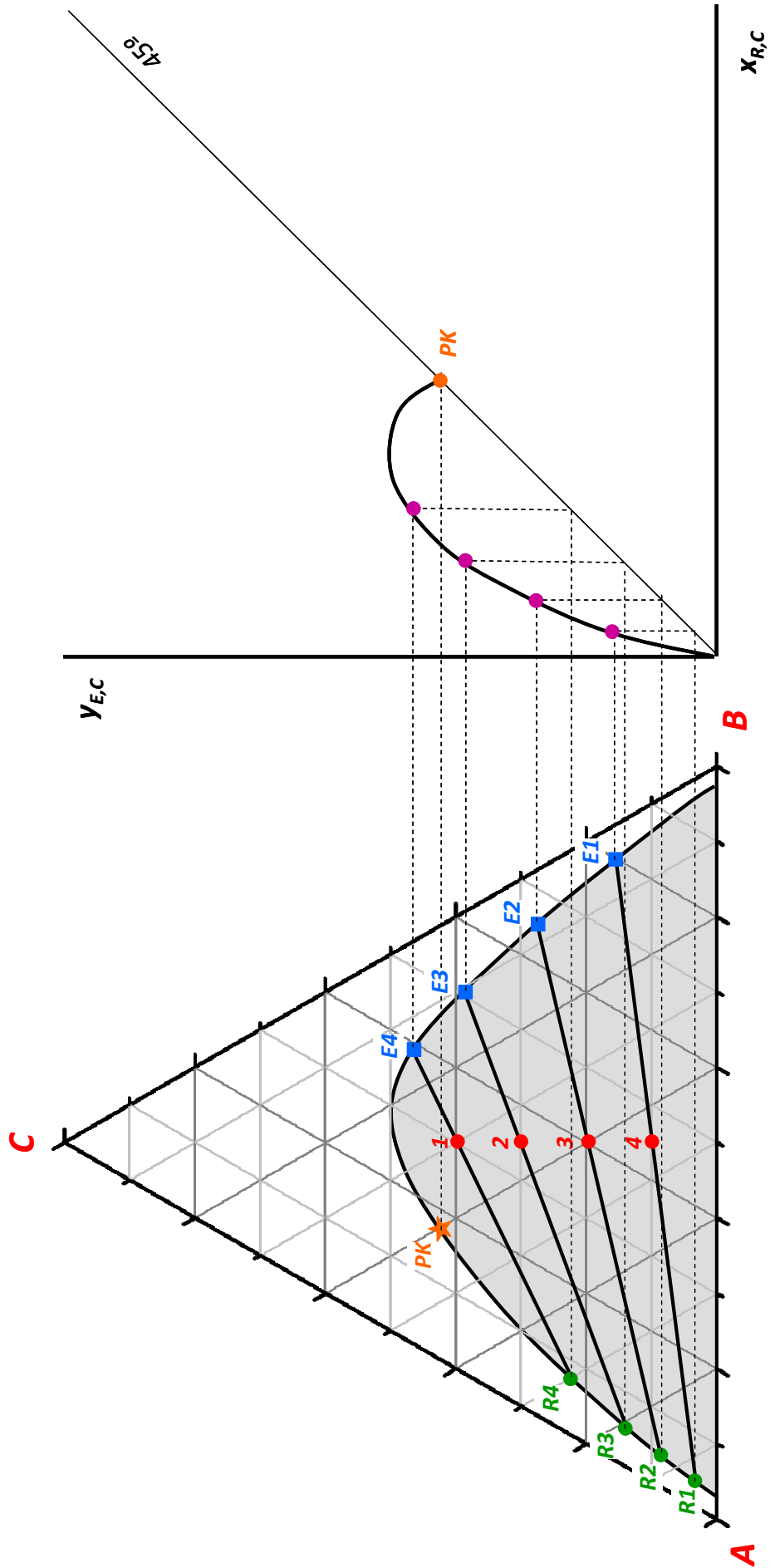
$$K_C = \frac{y_{E,C}}{x_{R,C}} \quad (14.4)$$

Banatze-koefizientearen balioa banatze-zuzenen maldaren arabera da:  $K_C = 1$  denean, banatze-zuzena horizontala da;  $K_C > 1$  denean, C solutuaren kontzentrazioa handiagoa da fase erauzietan fase finduetan baino;  $K_C < 1$  denean, berriz, fase finduetan fase erauzietan baino handiagoa da C solutuaren kontzentrazioa.

Banatze-kurba diagrama cartesiarrean irudikatzen da, eta  $x_{R,C}$  eta  $y_{E,C}$  ehunekoak adierazten dira. Beraz, 14.4(a) irudiko banatze-zuzen bakoitza ( $x_{R,C}$ ,  $y_{E,C}$ ) koordinatuko puntu bihurtzen da diagrama horretan. 45º-ko lerroa lagungarri gisa marrazten da. Lerro horretako puntuek C-ren ehuneko bera daukate fase finduan eta fase erauzian.

14.4(b) irudian agertzen da 14.4(a) irudiko sistemari dagokion banatze-kurba, eta hau da eraikitze prozedura: fase finduko puntutik marra horizontala eramaten da, 45º-ko lerroarekin elkartu arte, eta, hala, horrekin, marra bertikala marrazten da. Modu berean,

fase erauziko puntutik lerro horizontala marrazten da, bertikalean marraztutako lerroarekin elkartu arte.



14.4 irudia. Banatze-koefizienteen kurbaren lorpena.



14.4 irudiko PK puntuari **puntu kritiko** deritzo, eta sisteman fase findua eta fase erauzia puntu berean daudela adierazten du. A, B eta C osagaiez osatutako hirukote bakoitzaren konposizio kritikoa berezia da. PKri banatze-kurban dagokion PK puntua, noski, 45º-ko diagonalean kokatua dago,  $x_{R,C} = y_{E,C}$  baita.

Hala eraikitako banatze-kurbarekin eta disolbagarritasun-eremuaren diagramarekin, edozein banatze-zuzen interpola daiteke. Horretarako, banatze-kurba eraikitzeke erabili den prozeduran oinarritu behar da, eta alderantzizko urratsak egin.

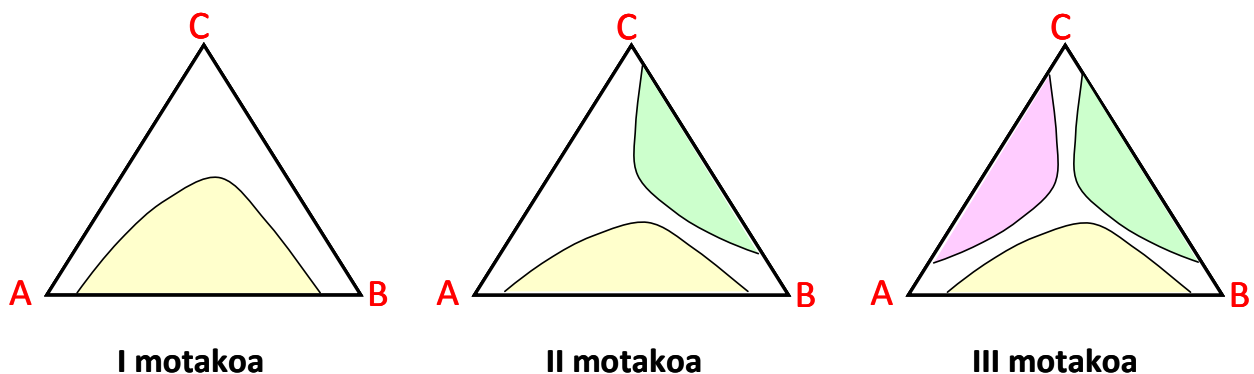
Banatze-kurbaren eraikuntza azaltzeko triangelu-diagrama erabili den arren, prozedura berberari jarraituz ere lor daiteke diagrama cartesiarra erabilita.

#### 14.4 NAHASTE HIRUTARREN OREKA MOTAK

Likido-likido erauzketak hiru likidoren nahastea erabiltzen du. Hiru konposaturekin (A, B eta C) osatzen diren hiru bikoteen (A-B, A-C eta B-C) disolbagarritasun-mailak desberdinak izan daitezke, eta hiru motatako orekak agertzen dira:

- *I motako oreka: bikote bakarra partzialki disolbagaitza, beste biak guztiz disolbagarriak*

Oreka mota ohikoena da. Horrelakoak dira, adibidez, ur-etanol-bentzeno edo azeton-ur-metilisobutilzetona sistemak.



#### 14.5 irudia. Nahaste hirutar likidoen oreka motak.

- *II motako oreka: bi bikote partzialki disolbagaitzak, bikote bakarra guztiz disolbagarria*

Irudian, A-C bikotea hartu da guztiz disolbagarri gisa. Gerta daiteke bi disolbagarritasun-eremuek bat egitea, hots, eremu bakarra izatea. Horrelakoak dira, adibidez, ur-metiletiletzona-klorobentzeno edo n-hexano-anilina-metilziklopentano sistemak.

- *III motako oreka: hiru bikoteak partzialki disolbagaitzak*

Ez dira oso ugariak, eta industria-mailako eragiketetan ez daukate aplikaziorik. Gerta daiteke hiru disolbagarritasun-eremuek bat egitea, hots, eremu bakarra izatea. Horrelakoa da, adibidez, nitrometano-etilenglikol-alkohol lauriko sistema.

#### 14.5 LIKIDO-LIKIDO ERAUZKETARAKO DISOLBATZAILEA AUKERATZEA

Likido-likido erauzketaz solutua behar bezala bereizteko erabiltzen den disolbatzaileak baldintza batzuk bete behar ditu; besteak beste, hauek:

**(a) Banatze-koefizientea ( $K_C$ )**

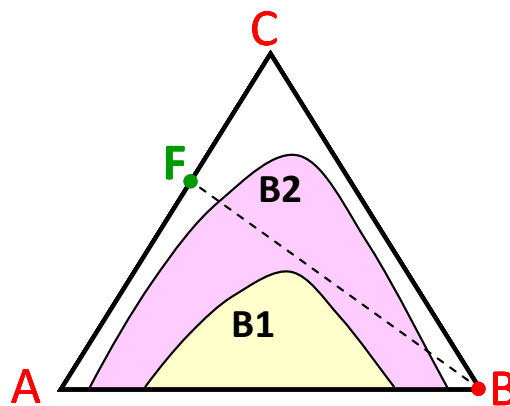
Solutu bakarra badago, bereizte-maila handia izan dadin,  $K_C$  ahalik eta handiena izatea komeni da. Ohartu gaitezen  $K_C = 1$  bada bereiztea lortzen dela, baina,  $K_C > 1$  den heinean, fase erauzian kontzentratuago lortzen dela.

**(b) Hautakortasuna (bereizte-faktorea) ( $\beta$ )**

Bereizte-faktorea bi osagaien banatze-faktoreen arteko erlazioa da:

$$\beta = \frac{K_C}{K_A} \quad (14.5)$$

Solutuaren eta diluitzailearen banatze-koefizienteek ahalik eta desberdinenak izan behar dute, bien arteko bereizketa egin ahal izateko, hau da,  $\beta \neq 1$  izan behar du.

**(c) Disolbagarritasun-eremua**

14.6 irudia. Bi disolbatzaileekin sortutako eremuak.

Disolbatzailea aukeratzeko orduan, disolbagarritasun-eremuaren hedadura begiratu behar da. Zenbat eta zabalagoa izan bi faseko eremua, orduan eta konposizio desberdineko nahaste gehiago bereiz daitezke. 14.6 irudian agertzen diren B1 eta B2 disolbatzaileak alderatuta, B2 disolbatzailearekin A-C nahaste gehiago bereiz daitezke.

Adibidez, F konposizioko elikadura B2 disolbatzaile puruarekin erauzketaz bereiz badaiteke ere, B1 disolbatzaile puruarekin bereizezina da, ezinezkoa baita nahastea fase biko eremuan izatea.

**(d) Disolbatzailearen berreskuragarritasuna**

Behin A eta C bereizita, fase erauzian dagoen C eta harekin dagoen B bereizi behar dira, eta, ondoren, B disolbatzailea berriro erabili ahal izango da. Beraz, B bereizteak erraza izan behar du.

**(e) Dentsitatea**

Zenbat eta handiagoa izan fase finduaren eta erauziaren dentsitateen arteko aldea, orduan eta errazago bereizten dira grabitatearen eraginez, eta, hala, ekipo txikiagoak behar dituzte.

**(f) Gainazal-tentsioa**

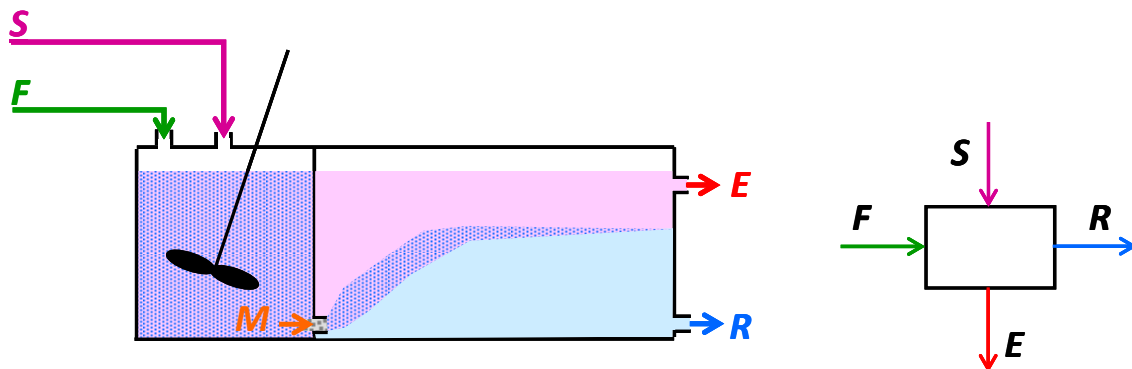
Zenbat eta handiagoa izan, orduan eta errazago bereizten dira bi faseak, baina orduan eta zailagoa da bi faseen artean kontaktu sakona izatea.

**(g) Beste ezaugarri batzuk**

Disolbatzaileak kimikoki inerteza izan behar du, lurrunkortasun txikikoa, biskositate baxukoa, merkea, ez toxikoa, ezta sukoia ere.

**14.6 LIKIDO-LIKIDO ERAUZKETA ETAPA BAKARREAN**

Likido-likido erauzketa egiteko ekiporik sinpleena *nahasgailua–fase-bereizgailua* izeneko ekipa bikoitza da. Eragiketa erraza denez eta malgutasun handia eskaintzen duenez, sarri erabiltzen da ekipa mota hori. Bereizi nahi den nahastea (elikadura,  $F$ ) eta disolbatzailea ( $S$ ) tangara sartzen eta etengabe irabiatzen dira, hiru osagaien artean kontaktu sakona bermatzeko;  $M$  nahastea lortzen da. Tanga horretatik geldikor eta atsedenean dagoen tangara igarotzen da nahastea, eta, han, bi faseak bereizi egiten dira grabitatearen eraginez: fase astunena behealdean metatzen den heinean, fase arinena horren gainean metatzen da. 14.7 irudian agertzen da horrelako ekipa baten eskema; era jarraituan lan egiten du. Ekipoek era ez-jarraituan ere lan egin dezakete, baina laborategietan besterik ez da egiten, normalean, industrian modu jarraituan lan egiten baita. Ekipoak modu egokian lan egiten badu, bi faseak orekan irteten dira, eta etapa burutuko da.



**14.7 irudia. Nahasgailu–fase-bereizgailu erako ekipa eta korronteen banaketa (fase erauzia arinena dela hartu da) eta adierazpen eskematikoa (eskuinean).**

**14.6.1 Eragiketaren diseinua**

Aurrerantzean, bereizi nahi den elikaduraren emari masikoari  $F$  deituko diogu (kg/h), eta nahaste horretan solutuaren pisu-ehunekoa  $x_{F,C}$  izango da. Disolbatzailearen emari masikoari  $S$  (kg/h) deituko diogu, eta korronte horretan solutuaren kontzentrazioa  $y_{S,C}$  izango da (disolbatzailea purua bada,  $y_{S,C} = 0$  izango da). Elikadura eta disolbatzailea ekipora sartzean, nahasgailuan  $M$  (kg/h) nahastea sortzen da, eta solutuaren konposizioa  $x_{M,C}$  da. Behin egoera geldikorra lortutakoan, masa-balantzeak eginez gero, nahastearen emaria eta konposizioa kalkula daitezke:

$$\text{Sistema osoa:} \quad F + S = M \quad (14.6)$$

$$\text{Solutua:} \quad F \cdot x_{F,C} + S \cdot y_{S,C} = M \cdot x_{M,C} \quad (14.7)$$

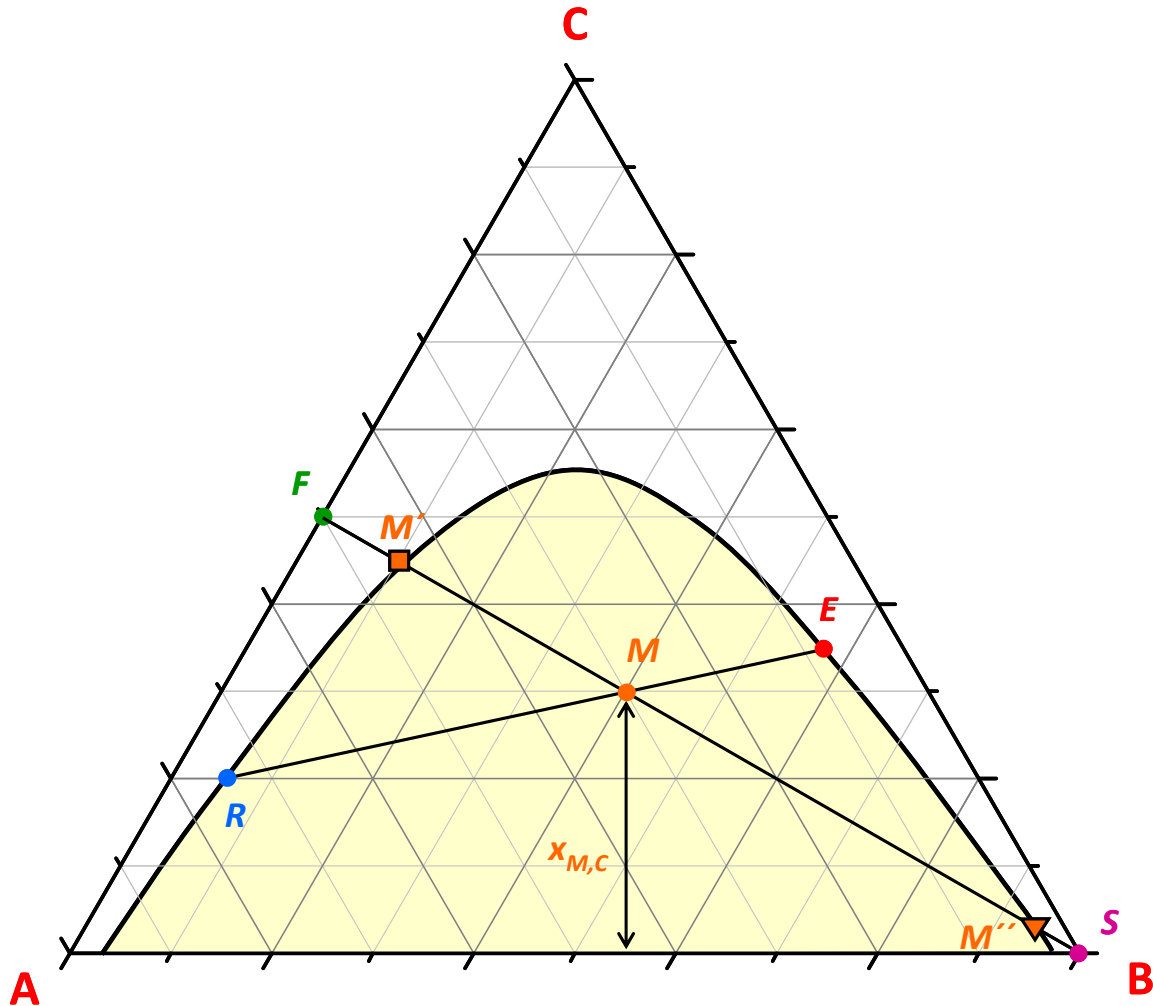
Nahasteak nahasgailua utzi eta bereizgailurako bidea hartzen du; han, grabitatearen eraginez, orekan dauden bi faseak —findua ( $R$ ) eta erauzia ( $E$ )— bereizten dira. Bi fase horietan solutuaren kontzentrazioak  $x_{R,C}$  eta  $y_{E,C}$  badira eta masa-balantzea egiten bada:

$$\text{Sistema osoa:} \quad M = R + E \quad (14.8)$$

$$\text{Solutua:} \quad M \cdot x_{M,C} = R \cdot x_{R,C} + E \cdot y_{E,C} \quad (14.9)$$

$x_{R,C}$  eta  $y_{E,C}$ -ren balioak orekakoak dira, eta triangelu-diagraman irakur daitezke.

Orain arte ebazpen analitikoa azaldu da, nahiz eta fase findu eta erauzietako konposizioak nahitaez triangelu-diagramatik lortu behar diren. Modu berean, ebazpen grafikoa egin daiteke, ondoren azaltzen den gisan. Azalpena triangelu-diagraman ematen den arren (ikusi 14.8 irudia), koordinatu cartesiarretan eraikitako diagraman ere berdin egiten da.



14.8 irudia. Etapa baten ebazpen grafikoa.

$F$  nahastearen eta  $S$  disolbatzailearen puntuak irudikatzen dira, konposizioak ezagunak baitira.  $M$  nahaste-puntua  $FS$  lerro zuzenaren gainean egongo da. Haren kokapen zehatza 14.7 ekuaziotik  $x_{M,C}$  kalkulatzearan lor daiteke.

$$x_{M,C} = \frac{F \cdot x_{F,C} + S \cdot y_{S,C}}{M} \quad (14.10)$$

Beste era batera ere lor daiteke  $M$  puntua kokatzea. Horretarako, palankaren erregela erabiliko da diagraman:  $\overline{FS}$  luzera grafikoa neurtzen da, eta  $\overline{FM}/\overline{SM}$  luzeren erlazioa palankaren erregelak ematen du:

$$F(\text{kg/h}) \cdot \overline{FM} = S(\text{kg/h}) \cdot \overline{SM} \quad (14.11)$$

$M$  puntua kokatu ondoren, fase biko eremuan dagoenez, orekan dauden  $R$  eta  $E$  faseetan banatuko da.  $E$  eta  $R$  puntuak kokatzeko  $M$  puntutik igarotzen den banatze-zuzena erabiliz,  $R$

eta  $E$ -ren emariak kalkula daitezke palankaren erregela erabiliz:  $\overline{RE}$  luzera neurtzen da, eta, grafikoan,  $\overline{RM}$  eta  $\overline{EM}$  luzerak neurtzen dira:

$$R(\text{kg/h}) \cdot \overline{RM} = E(\text{kg/h}) \cdot \overline{EM} \quad (14.12)$$

14.8 irudiari erreparatuz,  $M'$  eta  $M''$  puntuak agertzen dira irudikatuta. Lehenak erauzketa gerta dadin erabili beharreko gutxieneko disolbatzailearen emaria kalkulatzeko puntua ematen du, eta bigarrenak, berriz, erabil daitekeen disolbatzailearen emari maximoa:

$$S_{\min} = \frac{F \cdot \overline{FM'}}{\overline{SM'}} \quad (14.13)$$

$$S_{\max} = \frac{F \cdot \overline{FM''}}{\overline{SM''}} \quad (14.14)$$

### 14.6.2 Ekipoaren eraginkortasuna ( $\eta$ ) eta etekina ( $\zeta$ )

Fase erauzira igaro den solutu kantitatearen eta erabili den disolbatzaile kantitatearen arteko erlazio gisa definitzen da horrelako ekipoaren eraginkortasuna:

$$\eta = \frac{E \cdot y_{E,C}}{S} \quad (14.15)$$

Fase erauzira igaro den solutu kantitatearen eta elikatu den solutu kantitatearen ( $F$  korrontean soilik) arteko erlazio gisa definitzen da horrelako eragiketaren etekina:

$$\zeta = \frac{E \cdot y_{E,C}}{F \cdot x_{F,C}} \quad (14.16)$$

Ohar gaitzen etekina  $0 < \zeta < 1$  den bitartean, eraginkortasuna 1 baino handiagoa izan daitekeela.

## Adibidea 14.1 adibidea

A eta C osagaien nahaste baten 1000 kg/h (pisuan, % 50 C osagai) erauzten da B disolbatzaileaz nahasgailu—fase-bereizgailu bakar batean. Kalkula ditzagun (a) bereizi ahal izateko erabil daitekeen disolbatzailearen emari minimoa eta maximoa; (b) 500 kg/h disolbatzaile erabiltzen bada, sortzen diren bi faseetako emaria eta konposizioak; (c) fase finduan Cren edukia % 10 izateraino murriztu nahi bada, erabili behar den disolbatzailearen emaria; (d) (c) ataleko eragiketa gauzatzen bada, etaparen eraginkortasuna.

Datuak: disolbatzaile purua erabiliko da. Sistema horren oreka- eta disolbagarritasun-kurbak irudian agertzen dira.

### Ebazpena

Lehenik eta behin,  $F$  eta  $S$  puntuak irudikatzen dira, dagozkien konposizioak kontuan hartuta. Datu hauek ezagutzen ditugu:  $F = 1000$  kg/h ;  $x_{F,C} = 0,5$ ;  $y_{S,C} = 0$ .

(a) Palankaren erregela erabiliko da disolbatzailearen emari minimoa eta maximoa kalkulatzeko:

Grafikoan,  $\overline{FS} = 12,8$  unitate,  $\overline{FM'} = 1,4$  unitate eta  $\overline{SM'} = 11,4$  unitate direla neurtzen da. Modu berean,  $\overline{FM''} = 12,1$  unitate eta  $\overline{SM''} = 0,7$  unitate direla neurtzen da.

Beraz, 14.10 ekuazioaren arabera:  $S_{\min} = 123$  kg/h eta  $S_{\max} = 17285$  kg/h dira.

(b) Analitikoki ebazten bada,  $M1 = F + S = 1500$  kg/h eta  $x_{M,C} = 0,33$  lortzen dira.

$M$  nahastea bi fasetan banatzean,  $M1$  puntutik igarotzen den banatze-zuzenaren arabera banatzen da. Ondorioz,  $R1$  eta  $E1$  puntuak marraztu daitezke diagraman, eta haien konposizioak irakur daitezke:  $x_{R,C} = 0,16$ ;  $y_{E,C} = 0,42$ . Beraz, 14.5 eta 14.6 ekuazioak ebatziz,  $E1 = 1000$  kg/h eta  $R1 = 500$  kg/h lortzen da.

Grafikoki ebatziz gero, lehenik eta behin,  $M1$  puntua kokatu behar da, bai 14.7 ekuazioa ebatziz, bai palankaren erregela erabiliz. Grafikoan luzerak neurtuz,  $\overline{FS}$  luzera = 12,8 unitate dira. 14.8 ekuaziotik,  $1000 \cdot \overline{FM1} = 500 \cdot \overline{SM1}$  denez,  $\overline{FM1} / \overline{SM1} = 0,5$  lortzen da. Bi ezezaguneko eta bi ekuazioko sistema askatzean:

$\overline{FM1} / \overline{SM1} = 0,5$  eta  $\overline{FS}$  luzera = 12,8 unitate. Sistema ebatziz,  $\overline{FM1} = 4,3$  unitate eta  $\overline{SM1} = 8,5$  unitate izanik,  $M1$  puntua irudikatzen da.

Ondoren, banatze-zuzenaren luzera neurtzen da:  $\overline{E1R1} = 9,8$  unitate,  $\overline{R1M1} = 6,4$  unitate eta  $\overline{E1M1} = 3,4$  unitate. 14.9 ekuaziotik:  $E1 = 1000$  kg/h eta  $R1 = 500$  kg/h.

### Ebazpen grafikoa

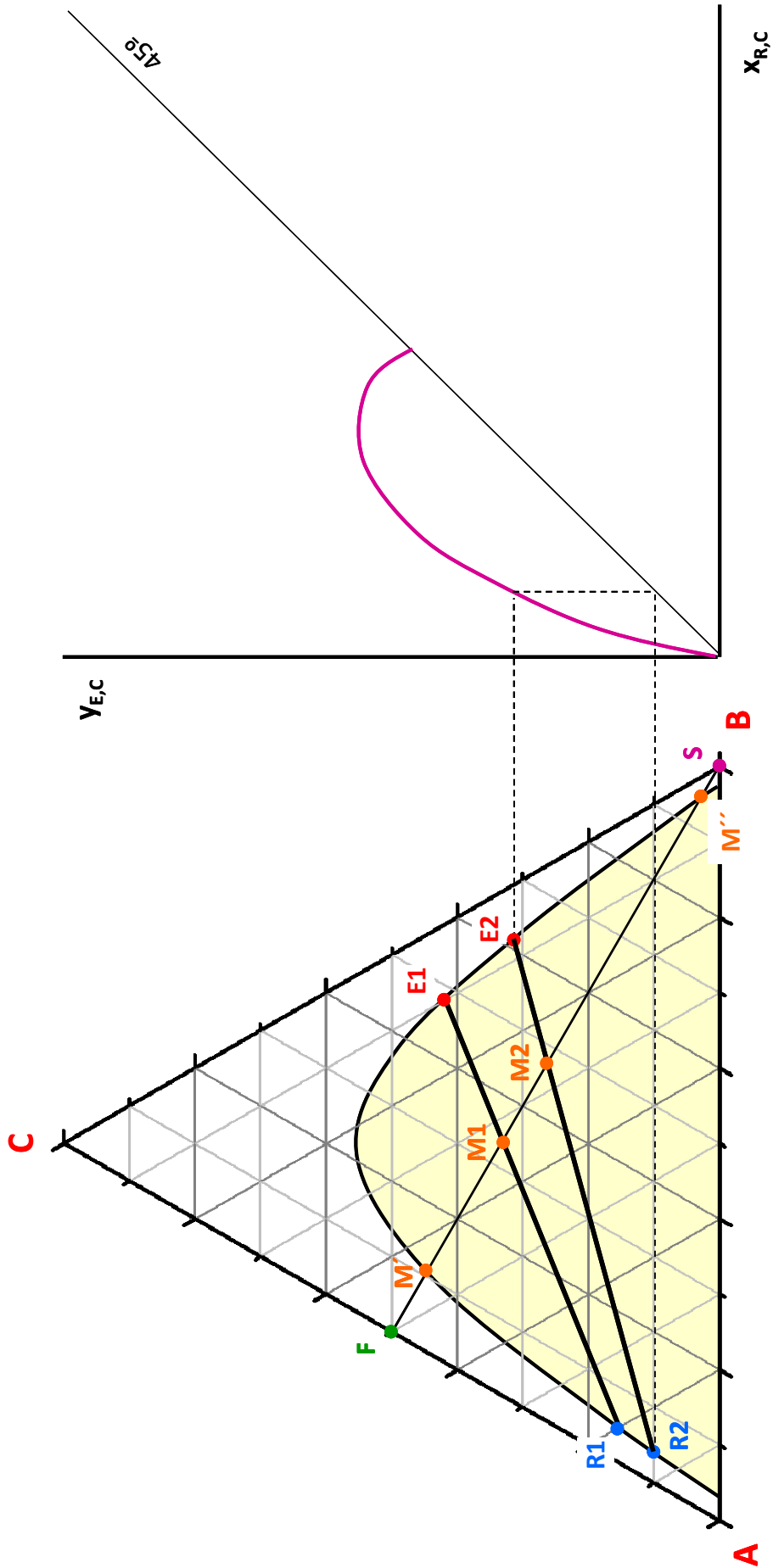
- (c) Horrela lan eginez, fase finduan Cren edukia % 50 izatetik % 16 izatera murriztu da. Haren edukia % 10 izateraino murrizteko disolbatzaile gehiago erabili behar da. Ebazpen grafikoa erabiliko da.

Kasu honetan,  $F$  eta  $S$  kokatuta daude, eta baita  $R2$  ere ( $x_{R,C} = 0,1$  egiten duen puntua). Nahasketaren masa-balantzeari dagokion lerroa marraztu daiteke jada.  $R2$  fase findua  $E2$  fase erauziarekin orekan dagoenez,  $R2$ -ri dagokion banatze-zuzena interpolatu behar da, banatze-kurbaren laguntzaz ( $x_{R,C} = 0,1$  eta  $y_{E,C} = 0,315$ ). Nahastearen  $M2$  puntua bi lerro zuzen horiek ebakitzen diren puntuak ematen du, bera baita bi baldintzak betetzen dituen puntu bakarra.

$x_{M,C} = 0,265$  dela irakur daiteke.  $\overline{FM2} = 6,1$  unitate eta  $\overline{SM2} = 6,7$  unitate neurtzen dira. Beraz, 14.8 ekuaziotik  $S = 910$  kg/h erabili behar da; nahastearen emaria  $M2 = 1910$  kg/h izanik.

Fase findu eta erauzien emari hauek lortu dira:  $E2 = 1450$  kg/h eta  $R2 = 460$  kg/h.

- (d) Disolbatzailearen  $S = 910$  kg/h emaria erabili da, eta Cren masa hau erauzi da:  $E2 \cdot y_{E,C} = 1450 \cdot 0,315 = 457$  kg/h. Horren ondorioz, ekipoen eraginkortasuna  $\eta = 0,502$  kg C/kg S da.



## 14.7 LIKIDO-LIKIDO ERAUZKETA ETAPA ANITZETAN

Etapa batean egindako bereizte-maila areagotu egin daiteke ekipo gehiagorekin lan eginez. Gainera, horrela lan egitean, handitu egiten da ekipoen eraginkortasuna, eta disolbatzaile gutxiago behar da helburu bera lortzeko, ekipo bakarreko eragiketarekin alderatzen bada.

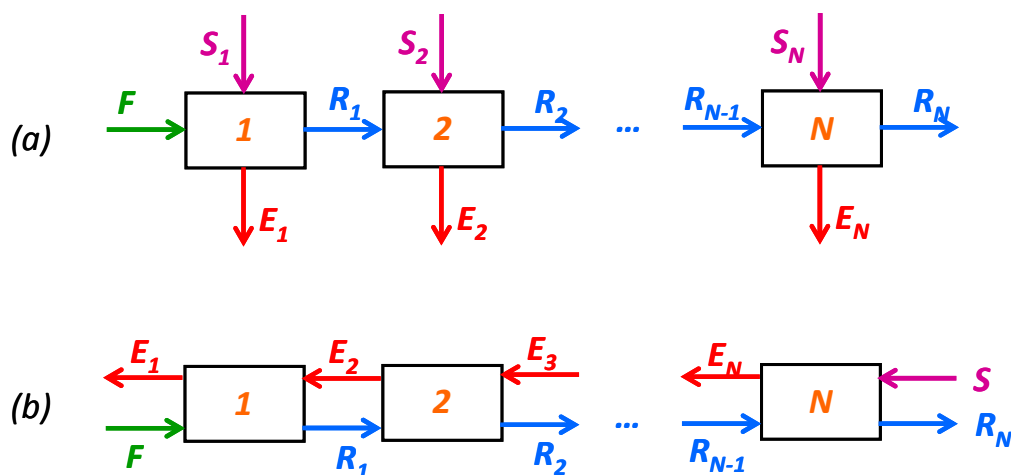
Zenbait ekipoz osatutako sistemak bi eratakoak izan daitezke, disolbatzaileak eta elikadura zirkulatzen duten moduaren arabera (10.9 irudia):

(1) *Korronte gurutzatuko sistema:*

Ekipo baten bi faseak nahasi eta bereizi ondoren, fase findua hurrengo ekipora sartzen da elikadura gisa, eta fase erauzia kanporatu egiten da. Hurrengo ekipora disolbatzaile berria sartzen da. Komertzialki gutxien erabiltzen den egitura izan arren (disolbatzaile gehiegi erabili behar da), egitura hori ere azalduko dugu hemen.

(2) *Kontrakorronteko sistema:*

Komertzialki gehien erabiltzen den egitura da, eraginkorragoa baita.  $S$  disolbatzailea azken ekipora sartzen da, eta  $F$  elikadura, lehen ekipora; ekipo bakoitzeko fase findu eta erauziak hurrengo eta aurreko ekipoetara sartzen dira, hurrenez hurren, elikadura eta disolbatzaile gisa.

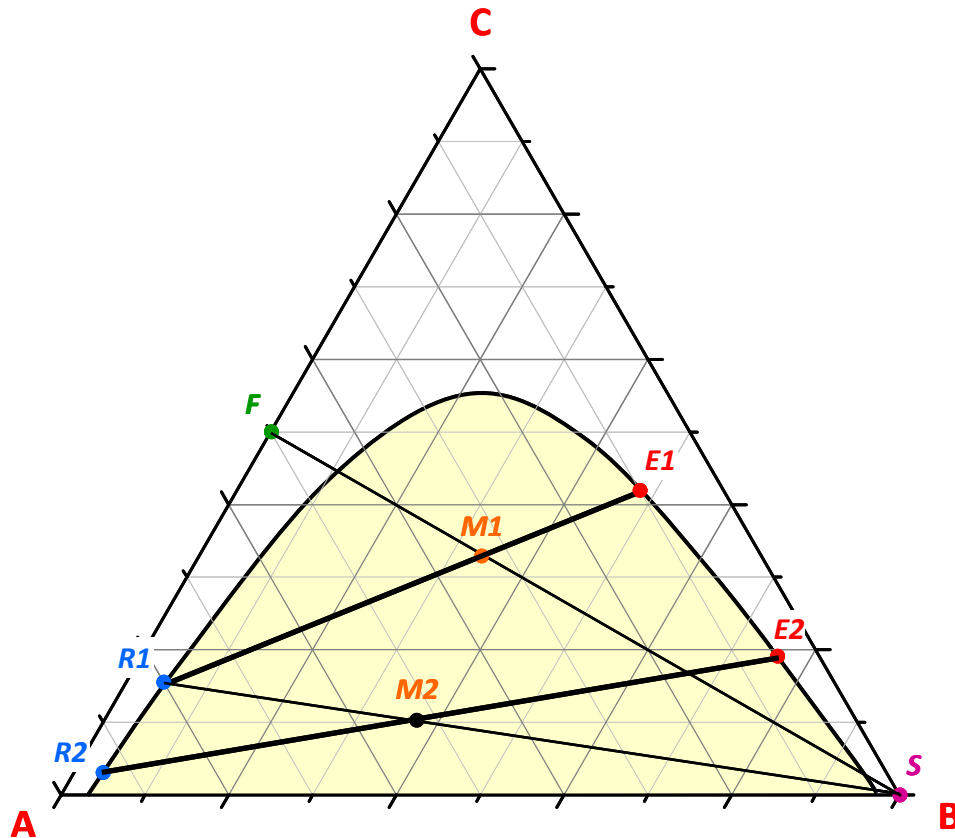


14.9 irudia. Etapa anitzeko egiturak: (a) korronte gurutzatua; (b) kontrakorrontea.

## 14.8 KORRONTE GURUTZATUKO SISTEMEN DISEINUA

Ekipo bakarrean erabilitako ekuazio berberak erabili daitezke. Lehen ekipotik irteten den fase findua ( $R1, x_{R,C}$ ) bigarren ekipoko elikadura bihurtzean, bigarren ekipoaren ebazpenean elikadura  $R1$  da, eta solutuaren konposizioa,  $x_{R,C}$ . Adibidez, 14.10 irudian agertzen da korronte gurutzatuan lan egiten duten bi etapatan lortzen diren faseen puntuak eta konposizioak, etapa bakoitzaren elikadura/disolbatzaile erlazioa 2 denean.





14.10 irudia. Bi etapako korrante gurutzatuko sistema.

### Adibidea 14.2 adibidea

A eta C osagaien nahaste baten 1000 kg/h (pisuan, % 50 C osagai) B disolbatzaile puruaz erauzten da korrante gurutzatuko nahasgailu–fase-bereizgailu sisteman. Fase finduan Cren edukia % 10 izateraino murriztu nahi bada, kalkula dezagun etapa bakoitzean elikadura/disolbatzaile erlazioa 3 bada zenbat etapa erabili behar diren gutxienez .  
 Datuak: sistema honen oreka eta disolbagarritasun-kurbak irudian agertzen dira.

*Ebazpena*

#### 1. etapa

$F + S1 = 1333,3 \text{ kg/h} = M1$  da,  $S1 = 1000/3 = 333,3 \text{ kg/h}$  baita.

$x_{M,C,1} = 0,375$  (irudian M1 puntua)

Lortzen diren bi faseen emariak eta konposizioak:

$E1 + R1 = M1 = 1333,3 \text{ kg/h}$

Grafikoan begiratu:  $x_{R,C,1} = 0,22$  eta  $y_{E,C,1} = 0,49$  dira.

Masa-balantzea eginez:  $E1 \cdot 0,49 + R1 \cdot 0,22 = 500 \text{ kg/h}$

$E1 = 765,5 \text{ kg/h}$  (fase erauzian 375 kg/h C osagai erauzten da)

$R1 = 567,8 \text{ kg/h}$  (fase finduan 125 kg/h C osagai geratzen da)

Etapa bakarrean ezin izan da fase finduko Cren edukia % 10 izatera heldu, % 22 izateraino murriztu da.

#### 2. etapa

$F = 567,8 \text{ kg/h}$  (% 22 C);  $S2 = 189,3 \text{ kg/h}$

$x_{M,C,2} = 0,165$  (irudian M2 puntua)

Lortzen diren bi faseen emariak eta konposizioak hauek dira:

$$E2 + R2 = M2 = 757,1 \text{ kg/h}$$

Irudian begiratzuz:  $x_{R,C,2} = 0,09$  eta  $y_{E,C,2} = 0,275$

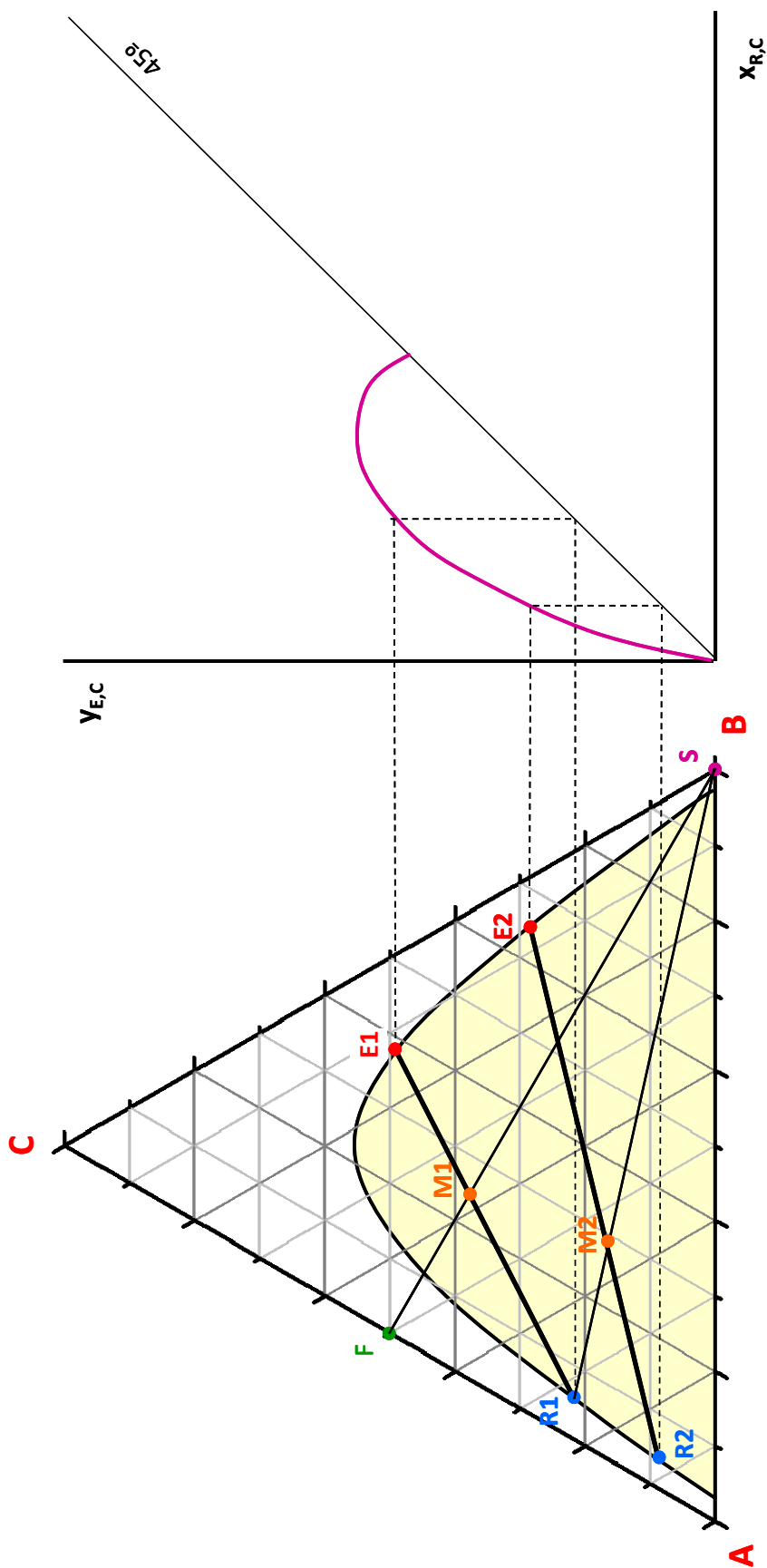
Palankaren erregela aplikatuz:

$$E2 \cdot 7,4 \text{ unitate} = R2 \cdot 5 \text{ unitate}$$

$E2 = 305,3 \text{ kg/h}$  (fase erauzian  $87,1 \text{ kg/h}$  C osagai erauzten da)

$R2 = 451,8 \text{ kg/h}$  (fase finduan  $40,6 \text{ kg/h}$  C osagai geratzen da)

Beraz, bi etapa behar dira, eta hasierako nahastetik  $462 \text{ kg/h}$  erauztea lortu da orotara.



14.2 adibidearen ebazpen grafikoa.

Emari horiek guztiak gutxi gorabeherakoak dira, grafikoan irakurtzea ez baita oso zehatza. Prozesu osoaren eraginkortasuna 0,884 kgC/kg S da, etapa bakarrean baino handiagoa.

## 14.9 KONTRAKORRONTEAN LAN EGITEN DUTEN SISTEMEN DISEINUA

14.9(b) irudiko sisteman lan egiten bada, solutua agortzen doan heinean ( $R_1, R_2, \dots, R_{N-1}$ ), fase finduko nahastea disolbatzailetan aberatsagoa den korrontearekin kontaktuan jartzen da ( $E_3, E_4, \dots, S$ ) hurrenez hurren, ekipo guztietan masa-transferentziarako indar eragile handia mantenduz.

Sistema osoarentzat masa-balantzea egiten bada:

$$\text{Sistema osoa:} \quad F + S = E_1 + R_N = M \quad (14.17)$$

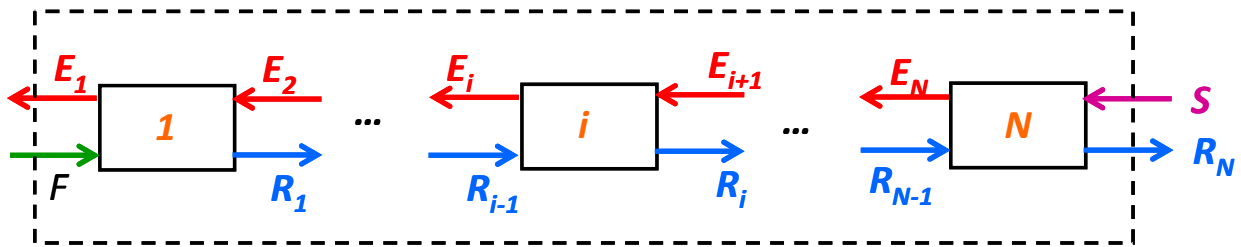
$$\text{Solutua:} \quad F \cdot x_{F,C} + S \cdot y_{S,C} = E_1 \cdot y_{E,C} + R_N \cdot x_{R,C} = M \cdot x_{M,C} \quad (14.18)$$

Hortik,  $F - E_1 = \Delta$  fokua lortzen da.

Edozein  $i$  etapako fase findua ( $R_i$ ) hurrengo etapako ( $i+1$ ) elikadura da; fase erauzia ( $E_i$ ), berriz, aurreko etapako ( $i-1$ ) disolbatzaile bihurtzen da. ( $i$ ) ekipoan masa-balantzeak eginez:

$$\text{Sistema osoa:} \quad E_i + R_i = E_{i+1} + R_{i-1} = M_i \quad (14.19)$$

$$\text{Solutua:} \quad E_i \cdot y_{E,C,i} + R_i \cdot x_{R,C,i} = E_{i+1} \cdot y_{E,C,i+1} + R_{i-1} \cdot x_{R,C,i-1} = M_i \cdot x_{M,C,i} \quad (14.20)$$



14.11 irudia. Kontrakorrantean jarritako nahasgailu-fase-bereizgailu sistema.

Lehen etapatik  $N$ . etaparaino masa-balantzea egiten bada (14.11 irudian marra etenez irudikatutako eremua):

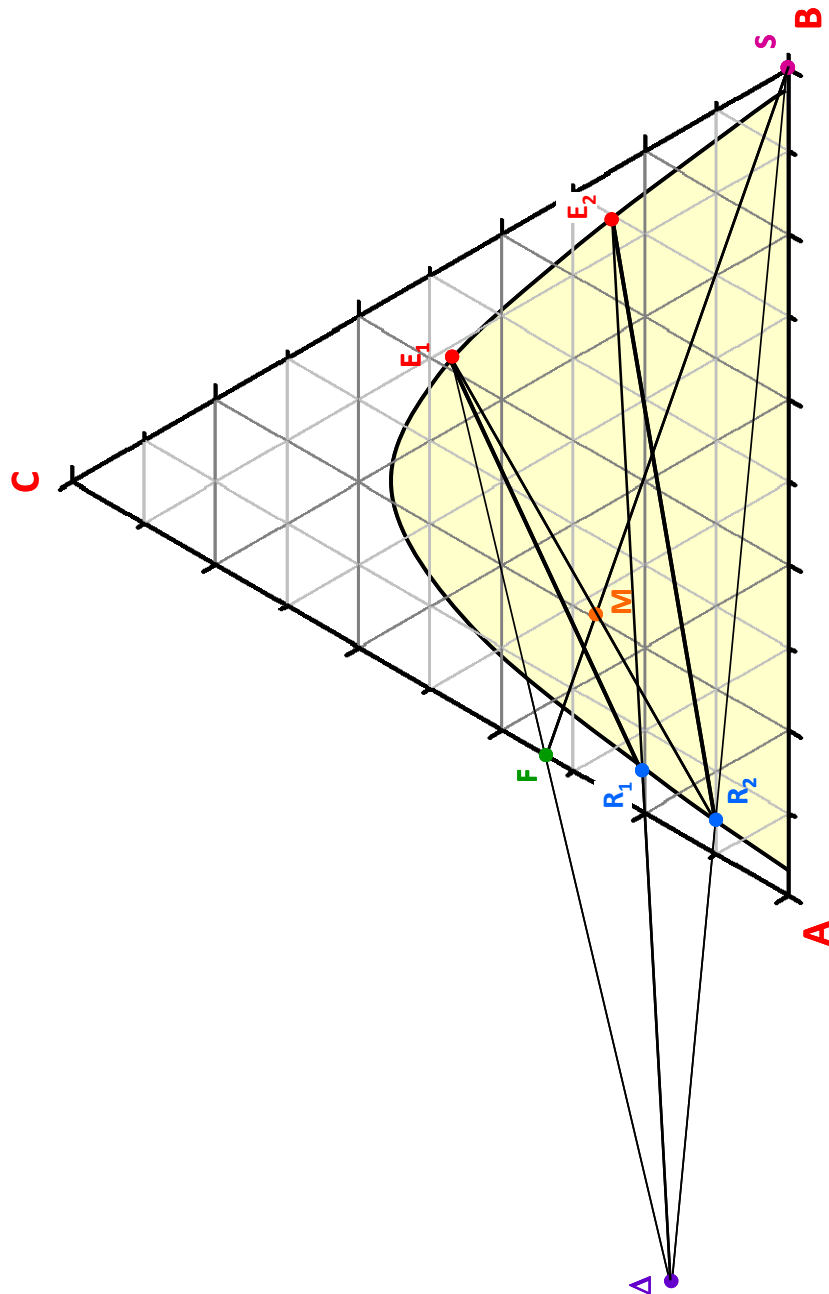
$$\text{Sistema osoa:} \quad F + E_{N+1} = E_1 + R_N \quad (14.21)$$

$$\text{Solutua:} \quad F \cdot x_{F,C} + S \cdot y_{S,C} = E_1 \cdot y_{E,C,1} + R_N \cdot x_{R,C,N} \quad (14.22)$$

14.21 ekuaziotik  $R_N - E_{N+1} = F - E_1 = \Delta$  lortzen da. Hori edozein etapatarako egin daiteke ( $1, \dots, N$ ). Ondorioz,  $R_i E_{i+1}$  zuzen guztiek fokua berdina daukate,  $\Delta$  alegia;  $F E_1$  eta  $R_N S$  zuzenak ere  $\Delta$  fokutzat daukate.

Ebazpen grafikoa egiteko, urrats hauei jarraitzen zaie (14.12 irudian, bi etapako sistemarentzat irudikatua):

- (i)  $F + S = M$  eta  $F \cdot x_{F,C} + S \cdot y_{S,C} = M \cdot x_{M,C}$  ebatziz,  $x_{M,C}$  lortzen da, eta  $M$  puntua grafikoa irudikatzen da.
- (ii) Azken etapen lortu nahi den fase finduko konposizioa ( $x_{R,C,N}$ ) jakinda,  $M$  puntutik pasatzen den  $R_N E_1$  lerroa marrazten da.
- (iii)  $F E_1$  eta  $S R_N$  lerroak bat egiten duten puntuan  $\Delta$  fokua marrazten da.
- (iv)  $R_1$  lortzen da  $E_1$  puntuarekin (banatze-zuzenarekin).
- (v)  $\Delta$  fokua erabilia,  $R_1$ -etik pasatzen den lerroa luzatuz  $E_2$  lortzen da.
- (vi) Etapa guztietan prozedura berdinari jarraitzen zaio.



14.12 irudia. Kontrakorrantean eraikitako bi etapatako sistemako  $\Delta$  fokuaen lorpena.

### Adibidea 14.3 adibidea

A eta C osagaien nahaste baten 1000 kg/h (pisuan, % 40 C osagai) B disolbatzaile puruaz erauzten da, kontrakorrantean jarritako nahasgailu–fase-bereizgailu sisteman, azken finduan Cren kontzentrazioa % 10 izan arte. Horretarako, 200 kg/h disolbatzaile erabiltzen bada (B purua), kalkula dezagun zenbat etapa behar diren eta eragiketaren eraginkortasuna.

#### Ebazpena

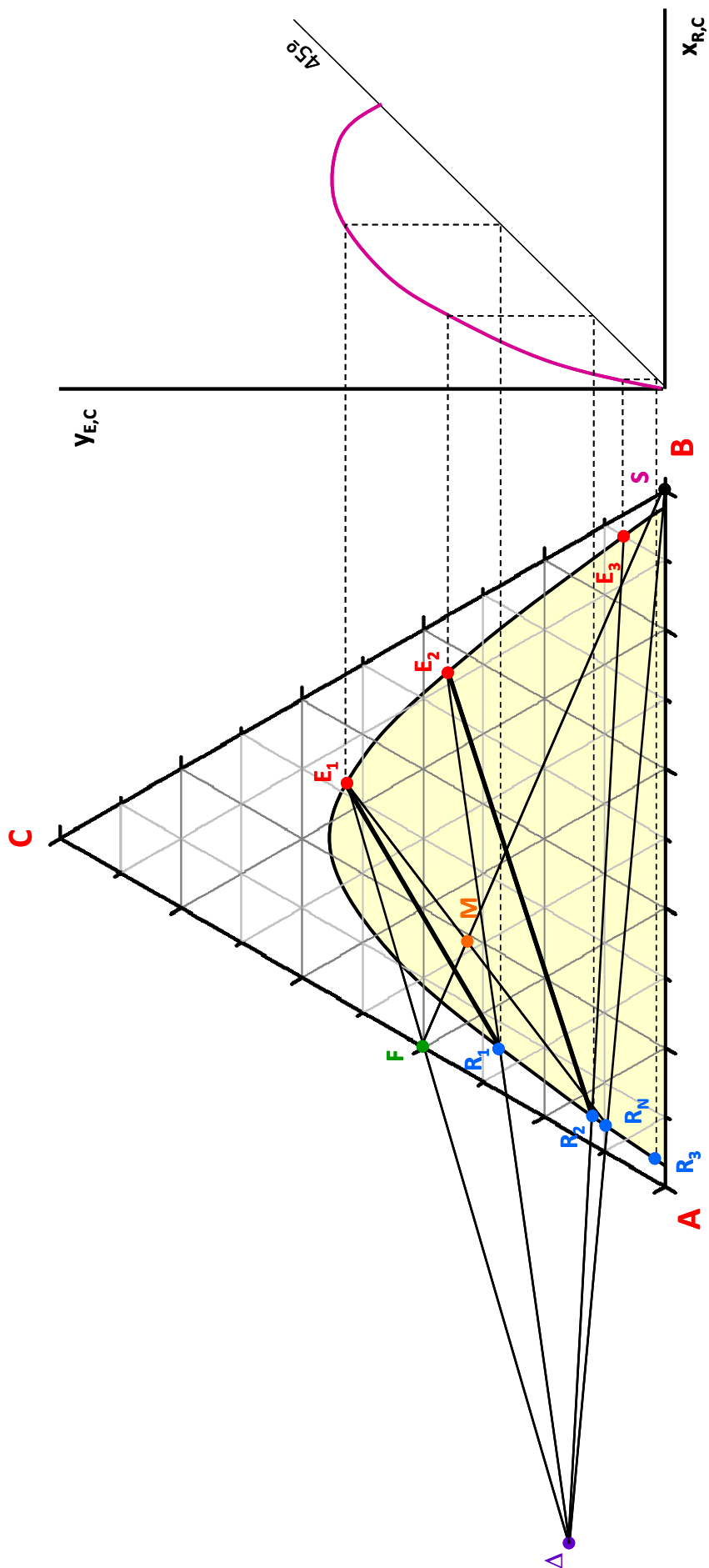
Lehenik eta behin, nahastearen M puntua lortu eta irudikatuko da ( $x_{R,N,C} = 0,1$  da):

$$F + S = M = 1000 + 200 = 1200 \text{ kg/h}$$

$$F \cdot x_{F,C} + S \cdot y_{S,C} = M \cdot x_{M,C}; 1000 \cdot 0,4 + 200 \cdot 0 = 1200 \cdot x_{M,C}; x_{M,C} = 0,333 \text{ da.}$$

M puntua marraztuta,  $R_N E_1$  lerroa marratzen da, eta  $y_{E,1,C} \approx 0,535$  dela ikusten da.

Ondoren,  $\Delta$  fokua marraztuko da.



Lehen etapan,  $x_{R,1,C} \approx 0,27$ ,  $y_{E,1,C} \approx 0,535$  konposizioko fase findu eta erauziak lortzen dira.

Bigarren etapan,  $x_{R,2,C} \approx 0,125$ ,  $y_{E,2,C} \approx 0,36$  konposizioko fase findu eta erauziak lortzen dira.

Bi etapatan helburua lortzen ez denez, hirugarren etapa bat eskatzen du.

Hirugarren etapan,  $x_{R,3,C} \approx 0,02$ ,  $y_{E,3,C} \approx 0,07$  konposizioko fase findu eta erauziak lortzen dira.

Hiru etapako eragiketa erabili behar da. Prozesuaren eraginkortasuna kalkulatzeko,  $E_1 \cdot y_{E1}$  kalkulatu da:

$$E_1 + R_3 = 1200 \text{ kg/h}$$

$$E_1 \cdot 0,535 + R_3 \cdot 0,02 = 1000 \cdot 0,40$$

Sistema hori askatzean,  $R_3 = 471,8 \text{ kg/h}$  eta  $E_1 = 728,2 \text{ kg/h}$  lortzen da. Beraz, orotara,  $389,6 \text{ kg/h}$  C erauzi denez, sistemak  $1,945 \text{ kg C/kg S}$  eraginkortasunaz dihardu.

## 14.10 GUZTIZ NAHASTEZINAK DIREN NAHASTEN ERAUZKETA KORRONTE GURUTZATUETAN

Kasu berezi honetan, har daiteke A eta B guztiz disolbaezinak direla kontzentrazio-tarte guztietan; hala, fase batetik bestera solutua bakarrik igarotzen da. Horrelako sistemaren adibidea piridina-ur-klorobentzeno (ura eta klorobentzenoa zeharo disolbaezinak) sistema da. Kasu horiek ebazteko, soluturik gabeko oinarrian emandako konposizioak erabiltzen dira.

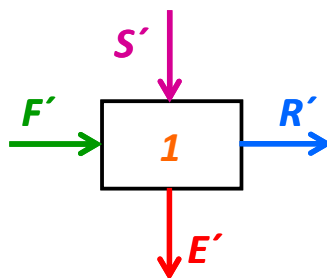
$$X_{F,C} = \left[ \frac{C}{A+B} \right]_F \quad (14.23)$$

$$Y_{S,C} = \left[ \frac{C}{A+B} \right]_S \quad (14.24)$$

$$X_{R,C} = \left[ \frac{C}{A+B} \right]_R \quad (14.25)$$

$$Y_{E,C} = \left[ \frac{C}{A+B} \right]_E \quad (14.26)$$

Elikadura A eta C osagaiez osatuta dago; disolbatzailea B eta C osagaiez osatuta dago; sortzen diren fase finduek A eta C besterik ez daukate; sortzen diren fase erauziek B eta C besterik ez daukate.



14.13 irudia. Korrante gurutzatuko ekipoen eskema soluturik gabeko oinarrian.

Nahasgailuan eta fase-bereizgailuan masa-balantzeak egiten badira (masa/t):

*Nahasgailuan:*

$$(A+B): \quad F' + S' = M' \quad (14.27)$$

$$\text{Solutua:} \quad F' \cdot X_{F,C} + S' \cdot Y_{E,C} = M' \cdot X_{M,C} \quad (14.28)$$

Fase-bereizgailuan:

$$(A+B): \quad R' + E' = M' \quad (14.29)$$

$$\text{Solutua:} \quad R' \cdot X_{R,C} + E' \cdot Y_{E,C} = M' \cdot X_{M,C} \quad (14.30)$$

Elikadura eta fase findu guztietan  $(A + B) = A$  da (B-rekin guztiz disolbagaitza delako), eta disolbatzailean eta fase erauzi guztietan  $(A + B) = B$  da. Beraz, masa-balantzea moldatzen bada:

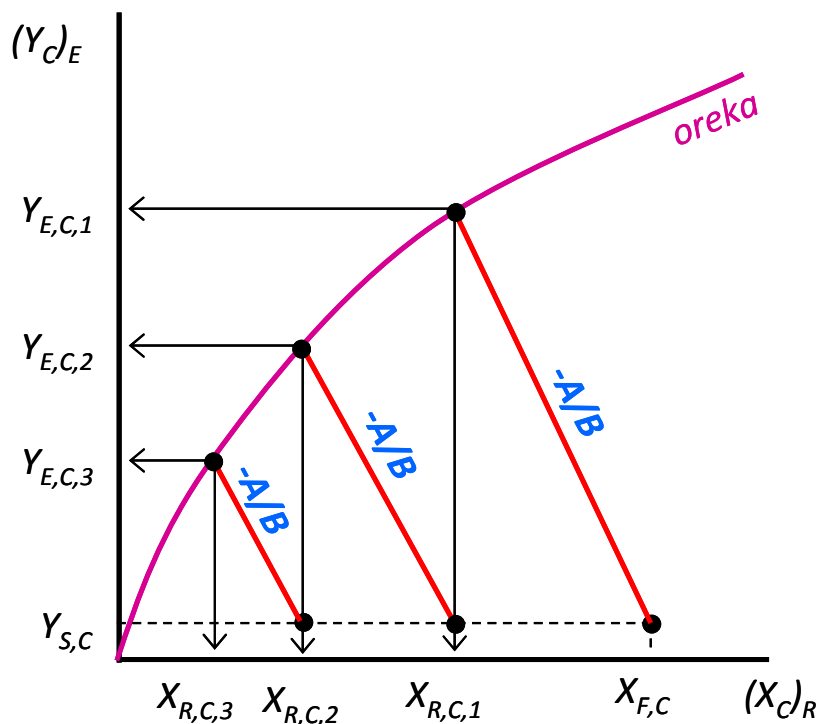
$$\text{Solutua:} \quad A \cdot X_{F,C} + B \cdot Y_{S,C} = A \cdot X_{R,C} + B \cdot Y_{E,C} \quad (14.31)$$

Ekuazio horretatik eragiketa-lerro hau lortzen da:

$$\frac{Y_{E,C} - Y_{S,C}}{X_{R,C} - X_{F,C}} = -\frac{A}{B} \quad (14.32)$$

Ekuazio hori  $(X_{F,C}, Y_{S,C})$  puntutik igarotzen den  $(-A/B)$  maldako lerro zuzena da, eta oreka-lerroarekin bat egiten duen puntuak  $(X_{R,C}, Y_{E,C})$  balioak ematen ditu.

14.13 irudian, hiru etapako sistemaren diseinua agertzen da. Sistema horretan, hiru ekipoetan elikadura/disolbatzaile erlazio  $(A/B)$  bera erabiltzen da (hiru maldak berdinak dira).



14.13 irudia. Masa-balantzeen irudikapena guztiz nahastezinak diren nahasteen erauzketan.

**Adibidea** 14.4 adibidea

A eta C osagaien 10.000 kg/h nahaste (% 30 C, solutua) B disolbatzaile puruaz erauzten da korrante gurutzatuko sisteman lan egiten duten bi ekipoko sisteman. Ekipo bakoitzean 5000 kg/h disolbatzaile erabiltzen bada, kalkula dezagun azken etapatik irteten den fase finduko C solutuaren kontzentrazioa.



Datuak: C osagaia guztiz disolbagarria da A eta B osagaietan; A eta B, ordea, bata bestean guztiz disolbaezinak dira. Oreka datuak irudian agertzen dira.

*Ebazpena*

$X_{F,C} = 3000/7000 = 0,43$  eta  $Y_{S,C} = 0$  (disolbatzailea purua delako)

A = 7000 kg/h eta B = 5000 kg/h dira

Lehen etapan:

Elikaduraren puntua:  $(X_{F,C}, Y_{S,C}) = (0,43, 0)$  da.

Puntu horretatik abiatuz,  $(-A/B = -1,4)$  maldako lerroa marrazten da orekarekin topo egin arte. Orduan,  $X_{1,C} \approx 0,275$  eta  $Y_{1,C} \approx 0,22$  irakurtzen dira irudian.

Bigarren etapan:

Elikaduraren puntua:  $(X_{1,C}, Y_{S,C}) = (0,275, 0)$  da.

Puntu horretatik abiatuz,  $(-A/B = -1,4)$  maldako lerroa marrazten da orekarekin topo egin arte. Orduan,  $X_{2,C} \approx 0,17$  eta  $Y_{2,C} \approx 0,15$  irakurtzen dira irudian.

Beraz, azken etapako fase finduan solutuaren konposizioa % 17 da.

