



A CONTRACORRENT

Claudi Mans i Teixidó

Departament d'Enginyeria Química i Metal·lúrgia
Universitat de Barcelona

A la pel·lícula que aquí es va dir *Cortina Rasgada* (*Torn Curtain*, Alfred Hitchcock, 1966) hi trobem un exemple clar del que és anar a contracorrent. El científic Michael Armstrong –Paul Newman– després de posar en peu d'alarma tot un teatre en cridar foc –per fugir dels seus perseguidors, policies de la República Democràtica d'Alemanya– va cap a una porta lateral amb la Sarah Sherman –Julie Andrews–. Però ha d'anar en contra del flux humà de gent que vol sortir per la porta principal. Al final –només faltaria– ho aconsegueix, però ha hagut d'anar contra el corrent humà, d'una manera que em sembla que és impossible, però, clar, si no ho aconseguia s'acabava la pel·lícula malament... Aquest article va de contracorrents, i, com solem fer, serà millor començar anant a la cuina.

REFREDAR ARRÒS BULLIT

A casa meva feien arrossos massa bullits i massa caldosos. Però de quan en quan el meu pare¹ agafava aquella pasterada –*morter*, en

¹ Sempre fèiem el mateix acudit. «L'arròs no és saludable perquè quan te'l menges se t'omple la boca de grans».

² El *morter* és la massa de ciment, aigua i sorra abans de ser posada en obra.

deia², la posava en un colador, i li tirava aigua freda de l'aixeta. Els grans d'arròs quedaven menys enganxosos, i més freds, a costa de perdre el midó del brou.

Imaginem que volem rentar i refredar una quantitat d'arròs, i que ho volem fer de la manera més eficaç possible. Posem-hi números, imaginem que tenim un quilo d'arròs acabat de bullir, a 100 °C, i que per refredar-lo i rentar-lo tenim només un litre –un quilo– d'aigua a 0 °C. Per facilitar els càlculs, imaginarem que l'arròs i l'aigua tenen aproximadament la mateixa capa-

citad calorífica, i que les úniques interaccions que hi ha són entre l'aigua i l'arròs: no es bescanvia calor amb l'exterior.

La primera idea que se'ns acut és barrejar directament l'arròs i l'aigua, i després colar-ho. Evidentment tindrem al final 1 kg d'arròs a 50 °C, i 1 kg d'aigua de rentat també a 50 °C. És el dibuix A de la figura 1.

Hi ha alguna manera de millorar aquest resultat? És a dir, podem refredar l'arròs per sota de 50 °C si només tenim un kg d'aigua a 0 °C?

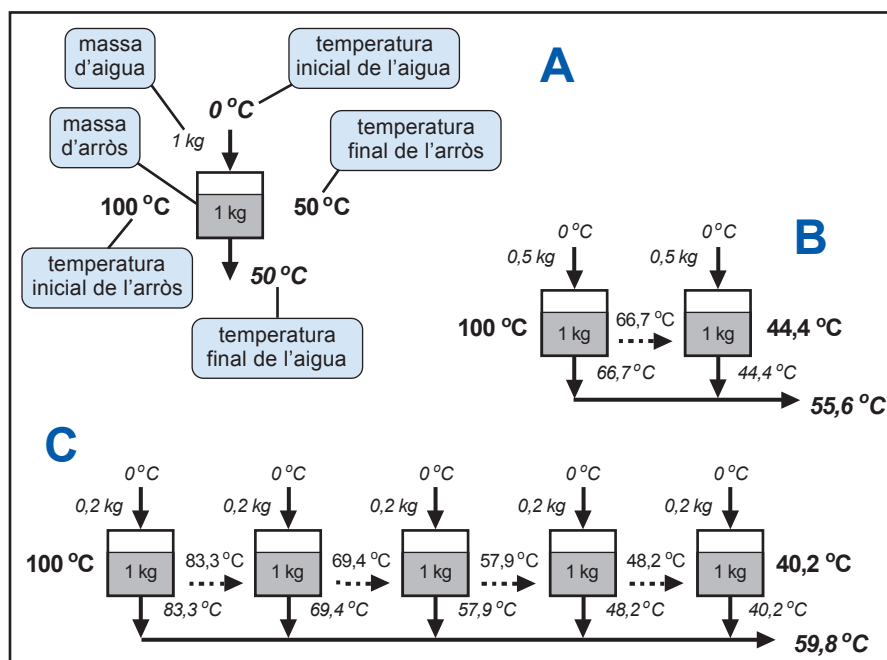


Figura 1. Refredem tot l'arròs amb porcions d'aigua.

Taula 1. Refredament de tot l'arròs amb porcions d'aigua

Nombre de porcions d'aigua	1	2	5	10	100	1000	infinit
Massa de cada porció d'aigua, kg	1	0,5	0,2	0,1	0,01	0,001	→ 0
Temperatura final de l'aigua, °C	50	55,6	59,8	61,4	63,0	63,2	63,21
Temperatura final de l'arròs, °C	50	44,4	40,2	38,6	37,0	36,8	36,79

Doncs sí. Rentem primer el quilo d'arròs només amb la meitat de l'aigua, i ho colem. El quilo d'arròs es refredarà, però no tant com abans, només fins a 66,7 °C, i ens queda també mig quilo d'aigua a la mateixa temperatura de 66,7 °C. A continuació, tornem a rentar l'arròs a 66,7 °C amb el mig quilo d'aigua a 0 °C que ens queda, i tornem a colar. Si ho comptes, lector, veuràs que l'arròs es refreda així fins a 44,4 °C, i a més tenim dos mitjos quilos d'aigua, a 66,7 i 44,4 °C respectivament, que si els barregem ens dóna un quilo d'aigua a 55,6 °C. Èxit! Hem aconseguit refredar més l'arròs que abans, i, com és lògic –l'energia es conserva– l'aigua se'ns ha escalfat més que en la primera prova. És el cas B de la figura 1.

Ara la imaginació ja no té límits. Dividim l'aigua freda en cinc parts, i en cinc operacions successives anem rentant i colant, rentant i colant, cada vegada amb dos-cents grams d'aigua freda a 0 °C. Al final tindrem l'arròs a 40,2 °C, i el quilo d'aigua que, barrejades totes les porcions parcials, estarà a 59,8 °C. Hem millorat una mica més el procés. El cas C de la figura 1 representa esquemàticament aquest darrer cas.

I si rentem cent vegades, cada cop només amb deu grams d'aigua freda? O mil vegades, cada cop amb només un gram –1 mL– d'aigua? A la taula 1 trobarem les temperatures de l'arròs i del conjunt de totes les aigües de rentat. Observem que hem millorat considerablement el refredament... a costa de fer-nos un fart de treballar: rentar l'arròs mil vegades, cada cop amb només un gram d'aigua, i anar perdent el temps i la substància. Com diria

Quevedo, «... entre lo que se les pegó a las uñas y se les quedó entre los dientes, pienso que se consumió todo, dejando descomulgadas las tripas de participantes»³.

Té un límit, això? Sí, té un límit. Però no és el límit que, en un excés d'optimisme, potser estàs imaginant. Suposant –que ja és suposar– que anem rentant tot l'arròs amb infinites parts infinitament petites d'aigua, totes a 0 °C, i que anem barrejant i colant cada vegada (!) en un temps infinit, clar, arribaríem al final a tenir el quilo d'arròs refredat fins a 36,79 °C, i el quilo d'aigua –la suma de tots els infinitèssims d'aigua– haurien arribat fins a 63,21 °C, evidentment⁴.

Per cert, que obtindríem el mateix resultat si, en lloc d'anar afegint miques d'aigua a tot el quilo d'arròs, anéssim afegint miques d'arròs a tot el quilo d'aigua. Però seria encara més difícil, des del punt de vista pràctic... Us imagineu intentant filtrar un diferencial d'arròs, recollir-lo d'un paper de filtre, etc.

—Aquest arròs encara és massa calent, s'ha de refredar més.

—Però si no tenim més aigua...!

—Doncs un altre dia, espavila't i fes-ho millor!!!

Podem fer-ho millor? Podem refredar més encara l'arròs amb només un litre d'aigua?

Doncs sí, si sabem explotar encara més la idea anterior.

Imaginem ara que agafem l'arròs i el dividim en dues fraccions iguals de mig quilo cadascuna, A i B, i l'aigua també en dues porcions

iguals de mig litre cadascuna, M i N. I ara procedim així: primer rentem la primera fracció A, a 100 °C, amb la primera porció d'aigua, M, que està a 0 °C. L'aigua i l'arròs en surten a la temperatura mitjana de 50 °C. Ho colem. I l'aigua M, ara a 50 °C, la fem servir per refredar la segona fracció d'arròs, la B, que encara està a 100 °C. L'arròs B surt net, a la mateixa temperatura de sortida de l'aigua, 75 °C, que és la mitjana entre 100 i 50 °C.

A continuació, amb la segona porció N d'aigua, que està encara a 0 °C, tornem a rentar les fraccions d'arròs A i B, que estaven respectivament a 50 i 75 °C. L'aigua s'escalfarà primer fins a 25 °C (i l'arròs es refredarà fins a 25 °C també). I amb aquesta aigua a 25 °C rentarem l'arròs B que estava a 75 °C. Tant l'aigua N com l'arròs B en sortiran ara a 50 °C.

Finalment, barrejem l'arròs A amb el B. Tindrem així un quilo d'arròs a la temperatura mitjana de 37,5 °C. I barrejem l'aigua M amb l'aigua N, i obtenim un quilo d'aigua a 62,5 °C. Hem complicat el procés una miqueta més, però ja intuïm l'eficàcia del procediment: amb quatre operacions hem assolit una temperatura de l'arròs que amb el procediment anterior de la figura 1 (tot l'arròs i miquetes d'aigua) ens hauria requerit unes 50 etapes. La figura 2 visualitza aquest nou procés.

Ara ja és qüestió només d'imaginar un procés més complex encara, i més eficaç. Dividim el quilo d'arròs, i el quilo d'aigua inicials

³ Francisco de Quevedo (1616). *Historia de la vida del Buscón, llamado don Pablos, exemplo de Vagamundos, y espejo de Tacaños*, cap. III.

⁴ El càlcul és senzill. N'hi ha prou amb integrar l'equació diferencial de la transferència tèrmica entre la massa de l'arròs (m_a) a la temperatura T_a i cada diferencial d'aigua (dm_w) a la temperatura T_w , tot aplicant-hi els valors numèrics corresponents.

$$m_a dT_a = (T_w - T_a) dm_w$$

en cinc (o en deu, o en cent...) parts iguals, i fem el mateix procés que en l'exemple anterior. És a dir, en la primera seqüència la primera porció d'aigua renta consecutivament totes les fraccions d'arròs, rentant i colant cada vegada; en la segona seqüència, la segona porció d'aigua renta novament totes les fraccions d'arròs ja rentades i refredades en la primera seqüència... i així fins a la darrera porció d'aigua, que rentarà també totes les fraccions d'arròs. Finalment, barregem totes les porcions d'aigua, i totes les fraccions d'arròs. El treball creix en proporció geomètrica: hem de fer l'operació de rentat i colar 25 (o 100, o 10000) vegades. Però el rendiment millora espectacularment. Amb cinc fraccions d'aigua i cinc fraccions d'arròs podem refredar-lo fins a 24,6 °C. Vegeu-ho a la figura 3.

Lector, potser no cal que et digui el que ja sospites, amb una certa incomoditat mental, per què negar-ho... Si dividíssim l'aigua en infinites porcions, i l'arròs en infinites fraccions també, i apliquéssim el procés anterior, al final... ¡tot l'arròs arribaria a estar a 0 °C i tota l'aigua acabaria a 100 °C! S'haurien bescanviat de forma reversible tota l'energia calorífica inicial... I això sense violar ni el Primer ni el Segon Principis de la Termodinàmica, només faltaria! Com és evident, en tots els casos, sempre una cosa més calenta ha escalfat una cosa més freda. La taula 2 ho resumeix, m'ho ha calculat l'ordinador.

En resum, i com a conclusió, és molt més eficaç usar petites quantitats amb operacions repetides consecutives que no una gran quantitat inicial una sola vegada. Aquesta és

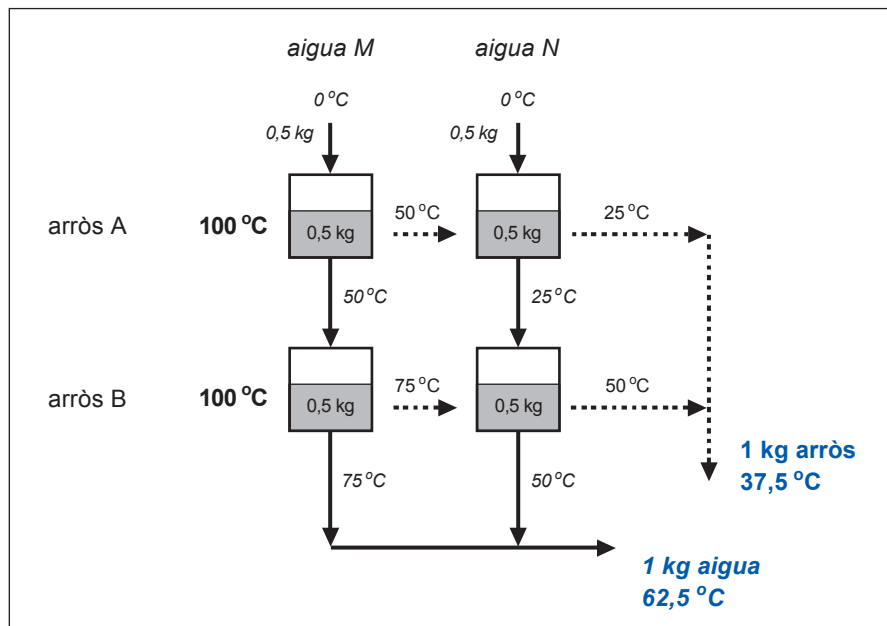


Figura 2. Refredament en quatre etapes.

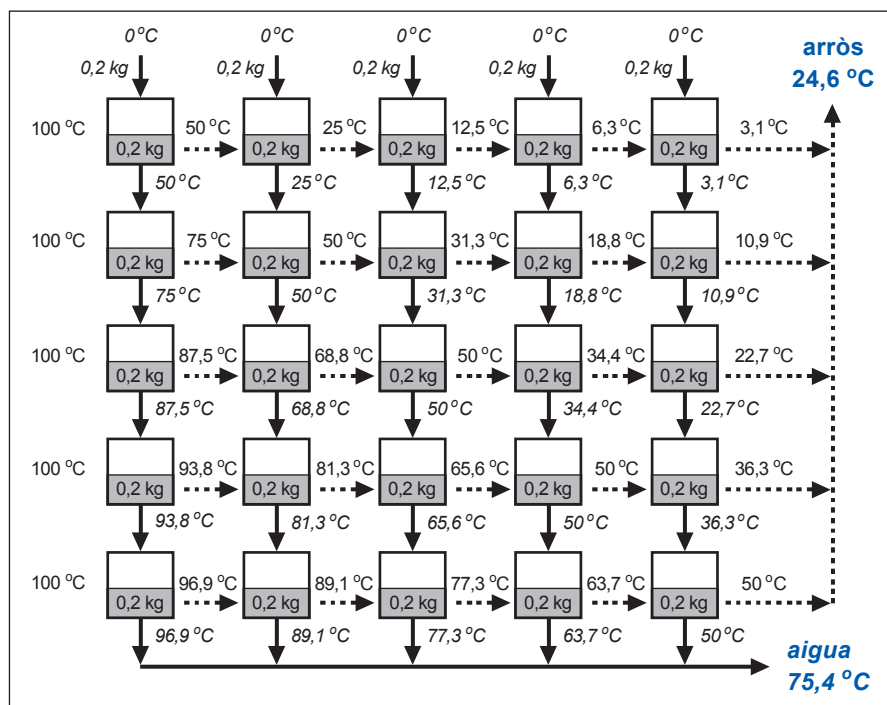


Figura 3. Refredament en vint-i-cinc etapes.

una idea que és vàlida no només per a bescanvis d'energia, sinó també en processos de dilució, rentatge o

extracció, en operacions on hi hagi bescanvi de matèria o d'energia en general.

Taula 2. Refredament de fraccions d'arròs i porcions d'aigua						
Nombre de porcions d'aigua	1	2	5	10	100	infinit
Nombre de porcions d'arròs	1	2	5	10	100	infinit
Operacions de rentat	1	4	25	100	10000	infinit
Temperatura final de l'aigua, °C	50	62,5	75,4	82,4	94,4	→ 100
Temperatura final de l'arròs, °C	50	37,5	24,6	17,6	5,6	→ 0

Aquest és el principi que implícitament es fa servir en les operacions de rentar i esbandir en el laboratori, on els aparells de vidre es renten repetidament amb petites porcions d'aigua o de dissolvent. O a la cuina, on és sempre més eficaç rentar els enciams o la verdura dues



Figura 4. Safareigs col·lectius de Mumbai.

te que hem usat quan refredàvem arròs. De la mateixa manera que per refredar l'arròs podem usar aigua a 0 °C, o a 10 °C o a qualsevol temperatura, sempre que estigui significativament per sota de 100 °C, per rentar una camisa no cal usar, al començament, aigua clara. Ho explicarem de manera qualitativa.

Imaginem que tenim una camisa molt, però molt bruta. Podríem fer un prerentat, i després el rentat. És el que fan les nostres rentadores automàtiques de roba. Però, tant en el prerentat com en el rentat fan servir aigua neta, que un cop bruta llencem a la claveguera. Llencem l'aigua, i llencem també l'energia calorífica, si hem fet servir aigua calenta.

Però, què passa si hi ha poca aigua?, com és el cas de Mumbai. Per estovar la brutícia, també es pot usar aigua no totalment sinó *relativament* neta. És a dir, en altres paraules, una aigua força bruta, sempre que sigui capaç d'arrencar brutícia de la camisa, i no al revés... Òbviament, si tan bruta fos l'aigua, embrutaria la camisa, i no ens serviria. No, ha de ser una aigua relativament neta, respecte a la brutícia de la camisa ⁷.

La camisa, un cop prerentada, és una mica més neta que abans, perquè la brutícia ha passat a l'aigua, que s'ha embrutat més. Aquesta aigua molt bruta la llencem. Ara es rentarà la camisa amb una aigua sabonosa més neta que la primera. La camisa quedarà més neta, i l'aigua, força bruta. Aquesta aigua for-

⁵ **aclarir** vol dir també «rentar la roba amb aigua un cop ensabonada». És sinònim d'*esbandir*.

⁶ *Els captaires de la tomba d'Haji Ali*, NPQ 399/2000, 18-20.

⁷ El Dr. *Matrix*, un personatge que no recordo si és d'en Martin Gardner o l'Isaac Asimov, proposava que s'han de tenir dues camises. Quan la que portes és més bruta que l'altra, et canvies de camisa. Així sempre vesteixes una camisa *relativament neta*.

o tres vegades amb poca aigua que una sola vegada amb més aigua. Si mires la publicitat d'aquestes amanides ja netes i tallades que venen pels supermercats ja ho diu: «*Rentades amb tres aigües*». I és que tres rentades és un bon compromís entre neteja i cost de l'aigua i de l'operació: hem diluït a una mil·lèsima la brutícia inicial. O els programes d'esbandit de les rentadores de plats o de roba.

Però ens haurem de mirar amb una mica més de delicadesa això del rentatge, per tal de treure'n l'aigua clara, a veure si ens aclarim ⁵. Parlant de rentar roba, analitzarem com s'ho fan per rentar les camises –i, en general, tota la roba– a Mumbai. Potser recordaràs que al primer article d'aquesta secció de l'NPQ ⁶ ja en parlàvem, de Mumbai. Avui en farem un segon lliurament.

LES CAMISES DE MUMBAI

Et preguntaràs si a Mumbai no renten la roba com a tot arreu, amb aigua i sabó o detergent. I sí, és clar. La diferència és la gestió de l'aigua, ells fan una aplicació dels principis d'estalvi d'aigua molt evident.

Resulta que no tots els hotels a l'Índia tenen sistemes de rentar la roba. I quan ja fa dies que vas pel món, amb calor i pols, a vegades tens roba bruta i et cal rentar-la. Doncs bé, deixes la roba bruta a la recepció de l'hotel, la recullen i a cada peça hi cusen una petita veta d'un color i amb uns signes especí-

fic de l'hotel (i de la teva cambra!). I la teva roba va a un centre de rentatge a l'aire lliure on es barreja amb centenars de milers de peces de roba procedents de tota la ciutat. La renten, l'estenen, la planxen, la clasifiquen i la porten a l'hotel, en un període de temps increïblement ràpid. I no ens van perdre ni un mitjà.

Aquest és un clar exemple d'un d'aquests processos centralitzats, generadors d'enormes quantitats d'entropia, i que només s'explica que existeixin perquè el cost de l'energia –per transportar i per clasificar– és baratíssim. I allà ho és, els sous són molt baixos. A l'Índia hi ha diversos altres exemples de processos així, ja n'anirem parlant en el futur, si em deixen seguir escrivint.

Però no és del procés de recollida i distribució de roba bruta i neta del que volia parlar, sinó dels propis safareigs on renten. Són una veritable atracció turística: els taxistes locals t'ho ensenyen, igual que t'ensenyen altres zones no precisament de rentar... Els safareigs consisteixen en una gran superfície exterior, amb centenars de safareigs interconnectats per canonades obertes i recs per on circulen aigües netes i brutes. En uns safareigs s'hi estoven les robes molt brutes, en altres es renten robes més netes, en altres s'esbandeix la roba... Mireu la figura 4 adjunta, de fa quinze anys. Potser ha canviat tot plegat...

I, com ho fan per aprofitar l'aigua? Doncs usant el mateix concep-

ça bruta serà precisament l'aigua amb la que començarem a preren- tar la camisa molt bruta. I finalment, esbandirem la camisa amb aigua neta, que entra al procés, i que queda força neta i apta per a la fase de rentat.

A la figura 5 A ho podem veure esquematitzat: les camises es van rentant amb aigua progressivament més neta, i l'aigua es va embrutant a mida que es va trobant amb camises cada cop més brutes.

Lector/a, no em diguis que no ho has fet mai, això. Quan no tens rentadora –a l'estiu, o a l'hotel, o a casa si s'ha espatllat la rentadora– rentes la roba en un gibrell, o a la pica. El primer mitjà el rentes amb aigua neta i sabó, però els darrers calçotets/calces les rentes amb aigua que de neta no en té res. Aquesta no és una pràctica que es limita al rentat de roba. Per exemple, els experts en gestió d'aigua proposen en certs casos retenir les *aigües grises* –aigua del rentat de roba, o de la dutxa– per usar-les després com a aigua del WC, o per altres usos que no requereixin aigua totalment neta.

CONTRACORRENT

Hi ha una certa similitud entre el rentat de roba i les operacions que fem per refredar l'arròs. Però hi ha una diferència important. En el cas de refredar l'arròs, en els processos més eficaços –figures 2 i 3– dividíem l'aigua i l'arròs en fraccions que anàvem posant en contacte entre sí, i al final agrupàvem totes les aigües i totes les fraccions d'arròs. En canvi, en el cas de les camises, tota l'aigua i tota la roba es posen en contacte en diferents etapes. Doncs bé, pot demostrar-se que els dos procediments són equivalents. És a dir, que una estratègia alternativa per refredar l'arròs seria disposar d'una sèrie enorme de recipients, en els que anéssim fent entrar de manera contínua l'arròs a baix cabal, i per l'altre extrem féssim entrar l'aigua

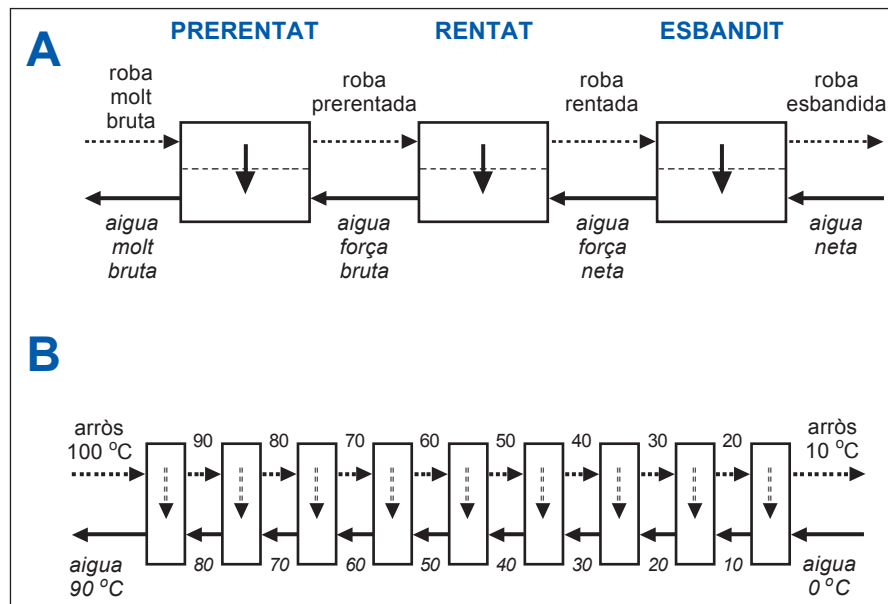


Figura 5. Dues operacions en contracorrent. El rentat de roba a Mumbai (A), i el refredament de l'arròs (B).

freda. De la mateixa manera que en el cas de la roba que es va rentant paulatinament i l'aigua embrutant-se paulatinament, l'arròs s'aniria refredant i l'aigua escalfant-se en sentit contrari... en **contracorrent**. No cal refredar l'arròs més calent amb aigua freda, podem usar aigua relativament freda, és a dir, sempre que sigui només una mica més freda que l'arròs que volem refredar. Vegeu-ho a la figura 5 B, on hem imaginat que l'arròs arriba a refredar-se de 100 a 10 °C amb un cabal igual d'aigua que s'escalfa de 0 a 90 °C.

Aquest procediment de treball en contracorrent, a la indústria és una pràctica habitual. Els bescanviadors de calor de doble tub, per exemple, es basen en escalfar un fluid que circula per l'interior d'una canonada amb un fluid que avança en sentit contrari per una canonada exterior concèntrica. Les columnes de rectificació o de destil·lació amb reflux no són més que un conjunt de plats, o un rebliment de plàstic, metàl·lic o ceràmic, on es posen en contacte un líquid que va caient des de dalt –el reflux– amb un vapor que va pujant des de baix, procedent del calderí. A mida que el líquid va caient va cedint components volàtils al vapor, que al seu torn va cedint els

components menys volàtils al líquid que cau. N'hi ha molts altres exemples, en les extraccions, en la cromatografia, en les absorcions... Qualsevol llibre d'Enginyeria Química n'és ple.

Les disposicions en contracorrent són més eficaços, consumeixen menys energia i són més petites que qualsevol altra disposició del mateix rendiment. Però, en la societat, anar a contracorrent és dur...

FINAL ADDICIONAL

Ja sé que no us ho creureu, però després d'escriure aquest article i abans de publicar-lo em vaig comprar un llibre de saldo a l'Hipercor, per 2,50 euros. El llibre, rus, d'alta divulgació científica⁸, conté a la seva pàgina 457 part de l'exemple de refredament amb que començo l'article. La diferència és només que en el llibre es barregen dues masses d'aigua i jo barrejo aigua i arròs. Per sort, arribem al mateix resultat numèric, 36,79 °C...

⁸ P. Makovetski. *Mire al fondo de las cosas*. Editorial Rubiños-1860, Euro-OMEGA (Madrid i Moscú), 1995.