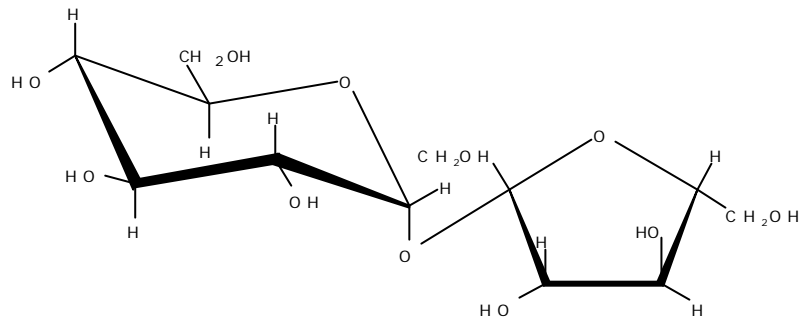


TRANSFORMACIÓN DE CARBOHIDRATOS: AZÚCAR

❖ azúcar o sacarosa:

- carbohidrato de fórmula general $C_6H_{12}O_6$
- disacárido formado por la unión de glucosa y fructosa:



❖ abunda en la naturaleza:

- caña de azúcar: 10 – 20 %
 - remolacha: 14 – 22 %
 - maíz dulce: 12 – 17 %
 - cebolla: 10 – 11 %
 - cacahuete: 4 – 12 %
- } uso industrial

❖ Países productores:

- caña de azúcar: *saccharum officinarum*
procede de la India
introducida por los árabes en España
Cristóbal Colón la introduce en América
Estados Unidos, Latinoamérica, África y Asia
- remolacha: *beta vulgaris*
descubierta por Olivier de Serres (1743)
Napoleón impulsa las industrias de obtención de azúcar a partir de remolacha
en España, la primera fábrica se abre en Córdoba en 1877
Estados Unidos, Europa y Rusia

❖ Producción en la Unión Europea:

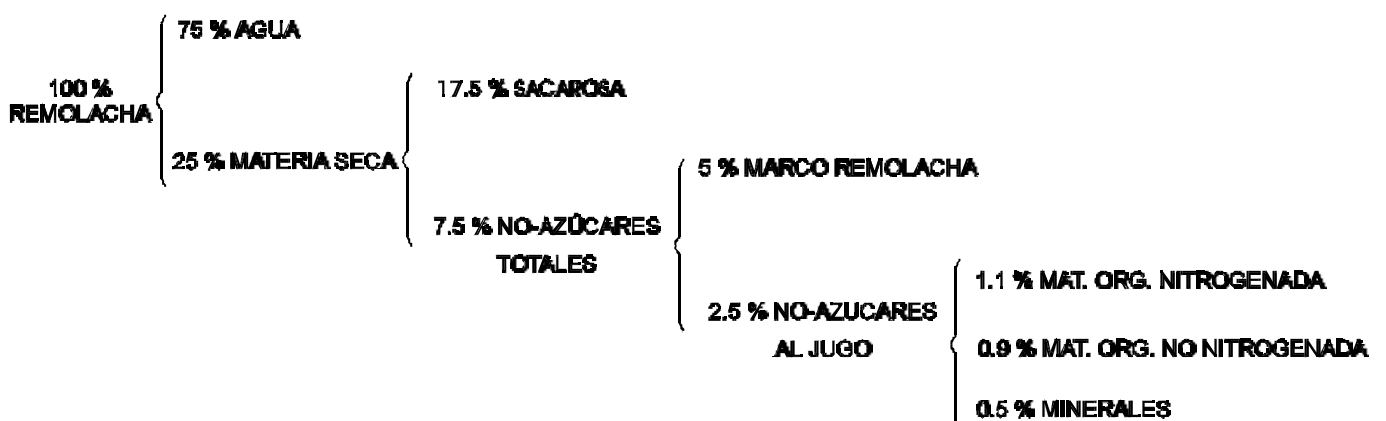
	Superficie (Ha)	Producción (t/a)
Francia	421 000	3 435 000
Alemania	399 000	3 191 000
Italia	270 000	1 719 000
Reino Unido	200 000	1 323 000
Holanda	137 000	1 219 000
España	190 000	1 006 000
Bélgica-Luxemburgo	118 000	936 000
Dinamarca	69 000	499 000
Grecia	43 000	287 000
Irlanda	38 000	186 000
Portugal	1 000	4 000
Total	1 886 000	14 133 000

❖ Producción en España:

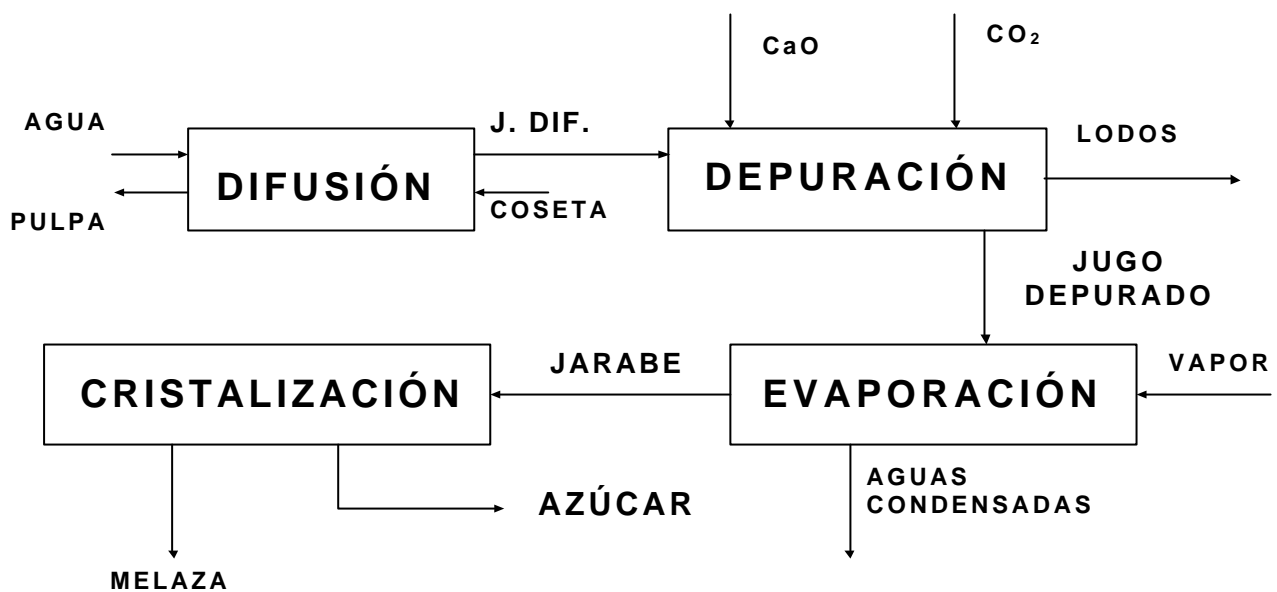
- tres zonas productoras: Norte, Centro y Sur
- grupos azucareros: Azucarera Ebro, S.L., ACOR, Azucareras Reunidas de Jaén
- número de fábricas: Norte (9), Centro (2) y Sur (4)
- capacidad de molturación: 5000 – 8000 t/d (normal)

❖ Composición de la materia prima:

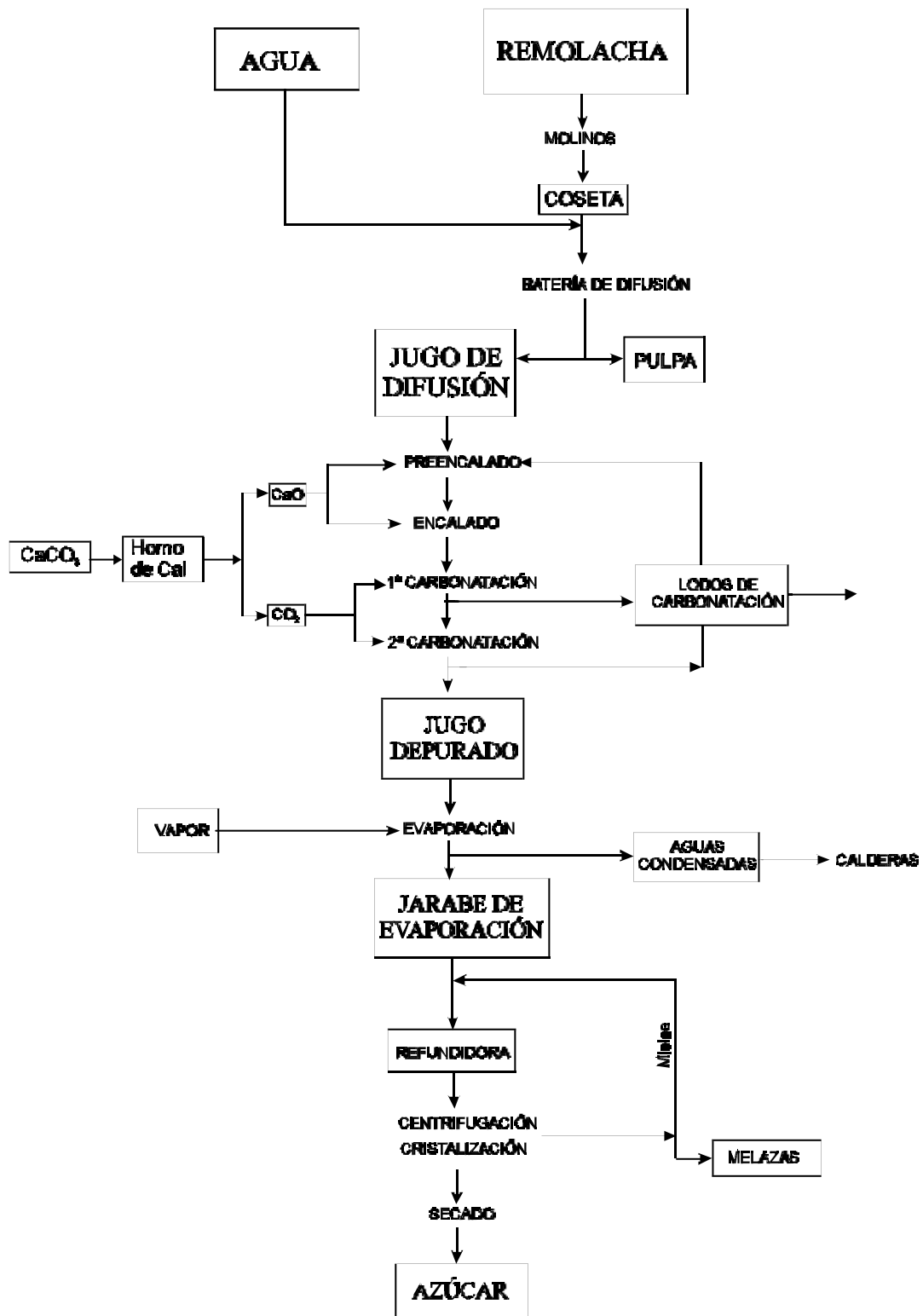
- caña de azúcar:
 - depende de las condiciones de crecimiento (clima) y del tiempo de maduración
 - composición aproximada:
 - 72 – 77 % agua
 - 23 – 28 % materia seca: 8 – 17 % sacarosa
- remolacha:



❖ Diagrama de Bloques:



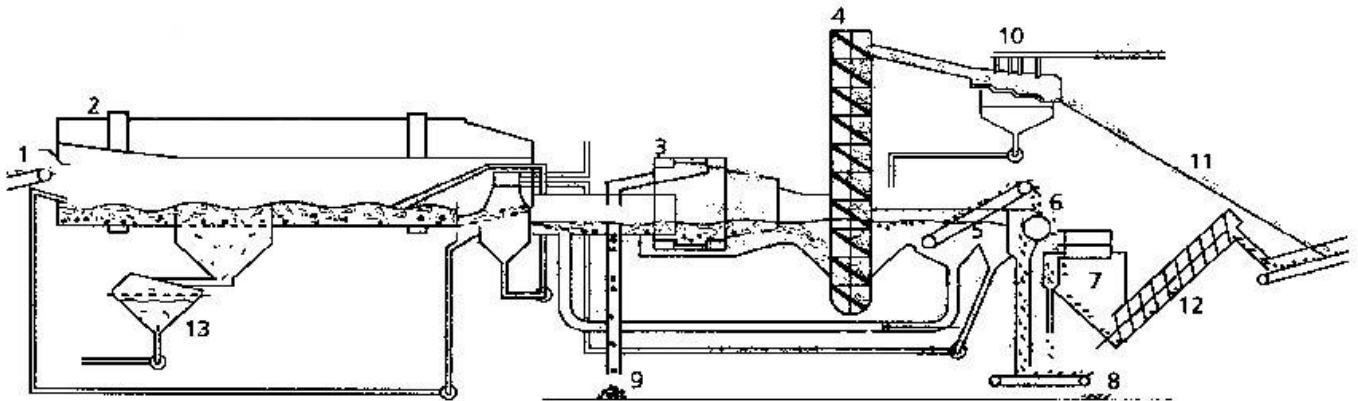
- **Producto:** sacarosa
- **Subproductos:** melaza
pulpa
- **Residuos:**
 - **líquidos:** aguas de lavado, aguas condensadas
 - **sólidos:** piedras, arenas, rabillos, etc... lodos carbonatación
 - **gaseosos:** amoniaco, dióxido de carbono



❖ Descripción del proceso:

- **Pretratamiento:**

- transporte a fábrica mediante canales de agua
- eliminación de piedras, arena



Planta de lavado

1. Cinta transportadora con remolacha sucia;
2. Lavador de tambor;
3. separador de piedras;
4. hélice;
5. separador de metales;
6. separador de hojarasca y raíces;
7. separador de material flotante;
8. materia orgánica separada;
9. piedras eliminadas;
10. lavador;
11. remolacha lavada a proceso;
11. remolacha troceada a proceso;
13. decantador de lodo

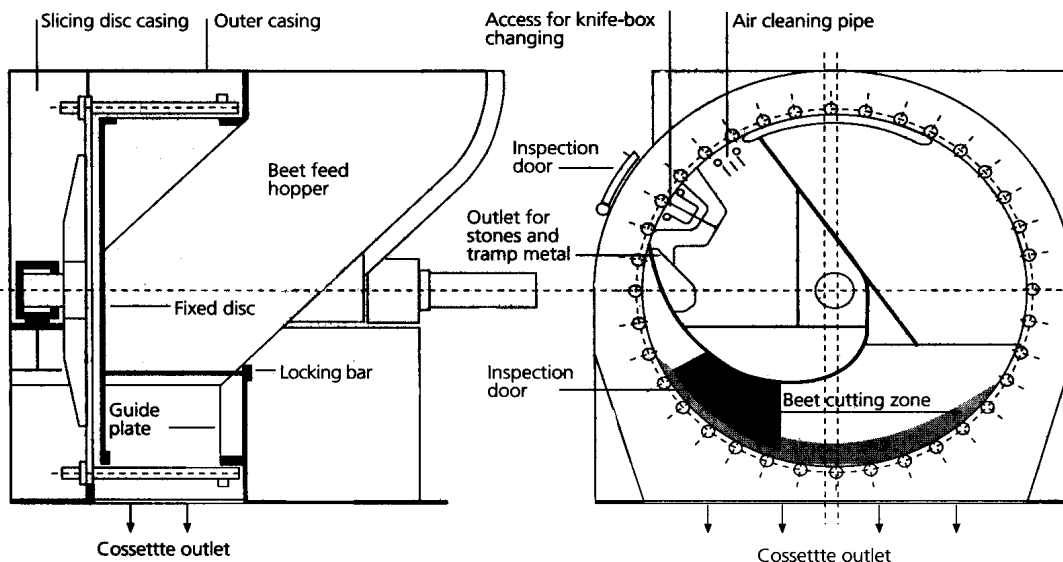


- **Molienda: obtención de *coquetas***

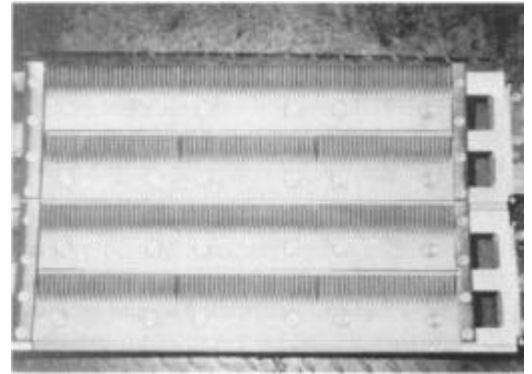
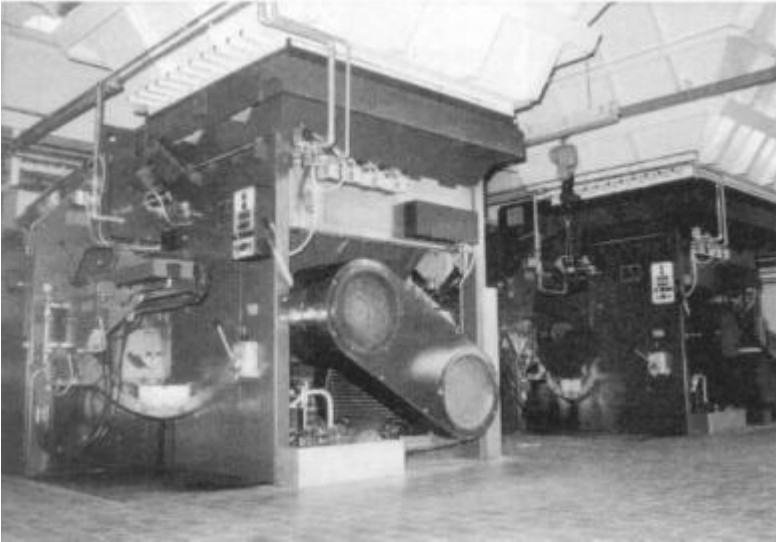
- **calidad de coquetas:**

- **número de Sillin:** longitud, en m, de 100 g de coqueta. Varía entre 10 – 18
- **número sueco:** estándar para la permeabilidad del lecho de coqueta. Se mide como el cociente masa de coquetas de longitud > 5 cm / masa de coquetas de longitud < 1cm y debe ser > 10
- **la relación masa de coquetas de longitud < 1 cm con respecto a la massa total de coqueta < 5 %**

- **cortadores de eje horizontal**



- **longitud del tambor: 600 mm**
- **cuchillas dispuestas en filas**
- **para 8000 t/d, diámetro del tambor 2200 mm y 22 bloques de cuchillas con 3 filas cada uno**

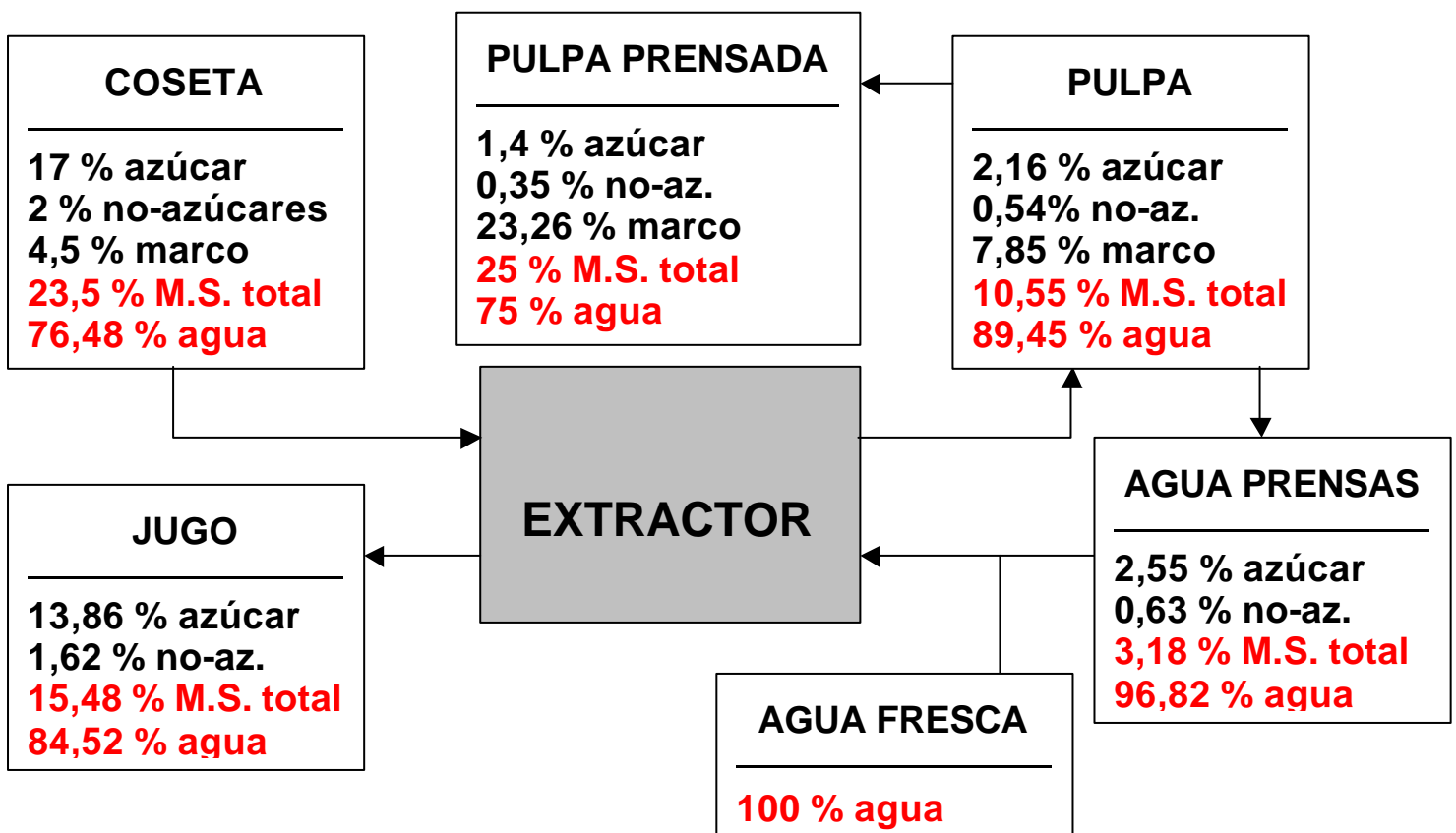


- **cortadores de disco o de eje vertical**



- **diámetro del disco ≤ 2780 mm**
- **para 4000 t/d, 32 bloques de cuchillas de longitud 400 mm**

- **Extracción: obtención de *jugo de difusión***
 - **Extracción sólido-líquido**
 - **Variables de operación:**
 - **calidad de las coquetas: tamaño y características físicas**
 - **agua de difusión: agua de prensas, condensados**
 - **temperatura: 68 – 75 °C**
 - **coeficiente de extracción (draft)**
 - **pH: 5,0 – 6,6**
 - **tiempo de extracción: fase sólida: 70 – 75 min; fase líquida: 130 min**
 - **presencia de oxígeno**
 - **Balance global de materia:**



○ Rendimientos de la extracción:

Componente	% extraído
Sacarosa	98
aminoácidos	100
Ácidos orgánicos	90
Sales inorgánicas	60 - 90
Proteína-pectina	f (pH, T)
Az. reductores	f (almacenamiento)

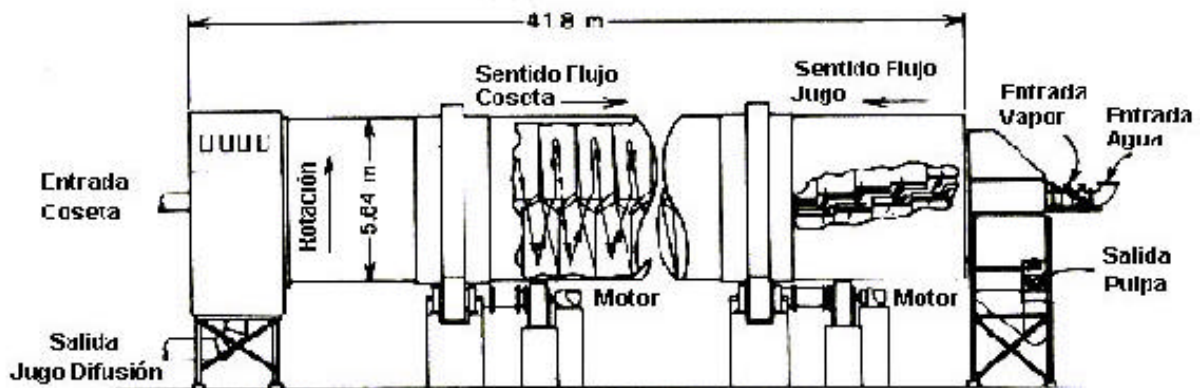
○ Balance de energía:

	Flujo (kg/h)	T (°C)	\hat{H} (kJ/kg)	H (kJ/h)
ENTRADA				
Remolacha	100,0	10	38	3 768
Agua extracción	39,5	65	272	10 752
Demanda calor				959
Total				15 474
SALIDA				
Jugo	120,0	23	88	10 551
Pulpa prensada	19,5	60	229	4 421
Pérdidas				3 349 (36 %)

- Equipo: extractor en contracorriente:

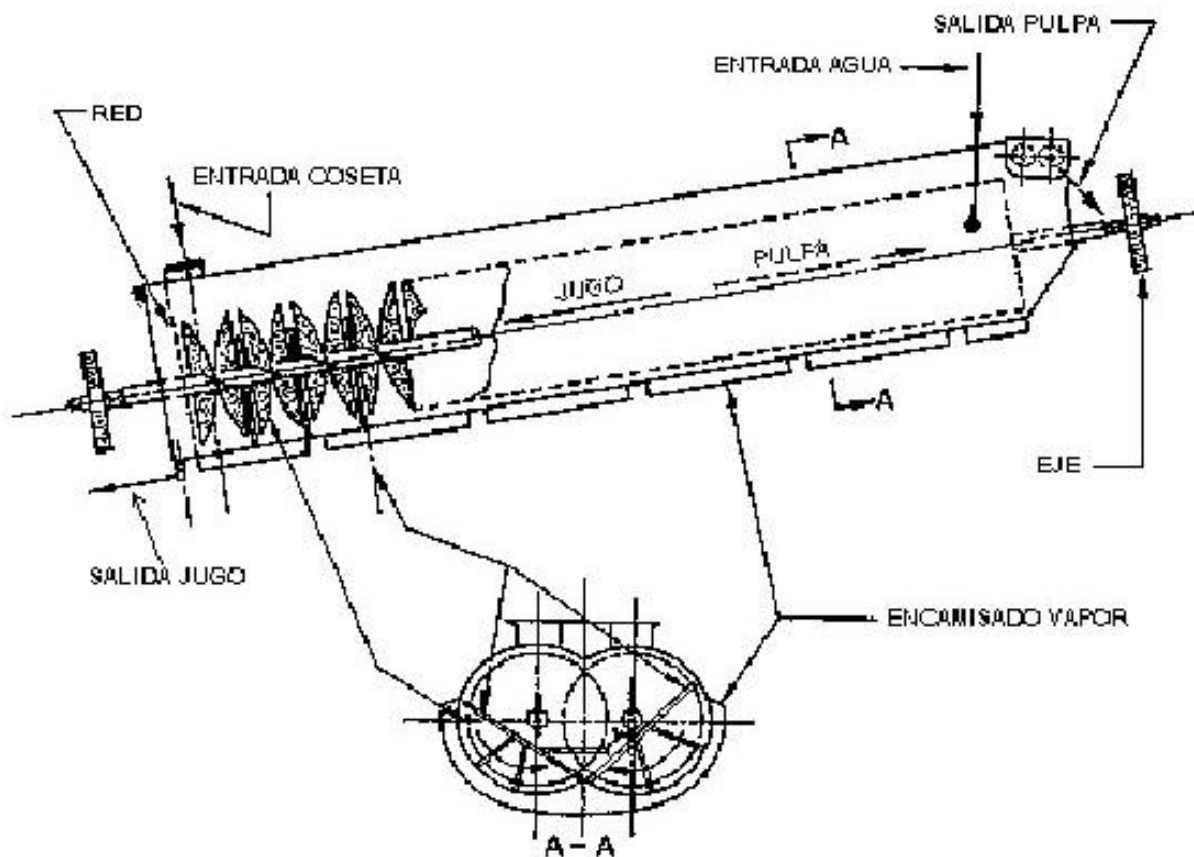
- ◆ Transporte controlado de jugo y coqueta: *Difusor RT*
- ◆ Transporte controlado de coqueta: *Difusores Silver chain, Olier, etc...*
- ◆ Transporte incontrolado de jugo y coqueta: *Difusores BMA y DDS*

Difusor RT:



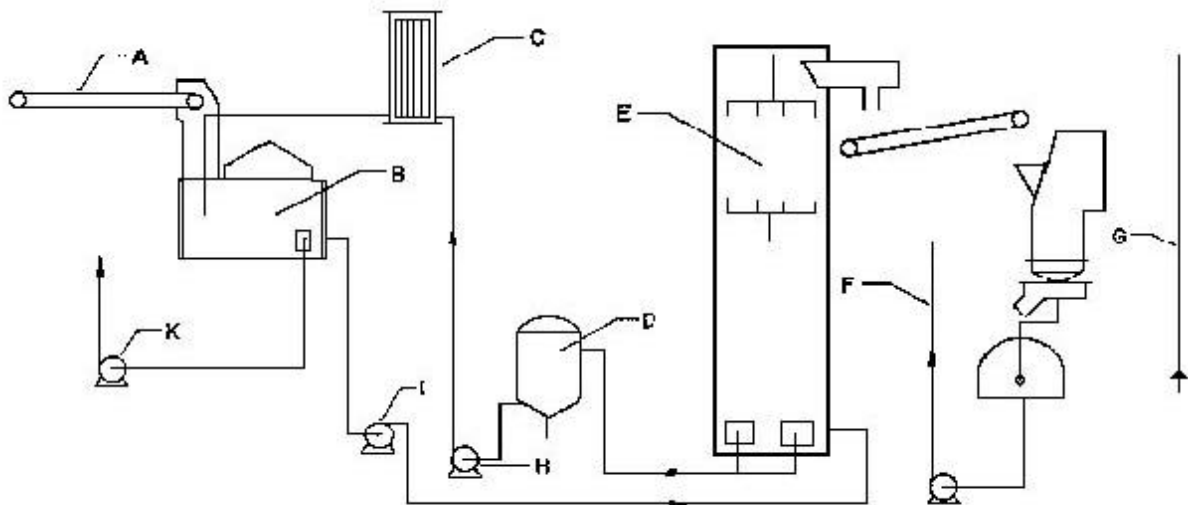
- cilindro rotatorio horizontal, construido según el principio del tornillo de Arquímedes
dimensiones máximas: $D = 7,6\text{m}$, $L = 61\text{ m}$ (12000 t/d)
- no presenta partes internas móviles
- movimiento de las cosetas en un sentido y del jugo en el contrario. Las cosetas mueven un paso por cada revolución y el jugo es movido dos pasos hacia atrás
- diagrama de flujo de la etapa de extracción con difusor RT:

Difusor DDS:



- depósito en forma de U en el que dos agitadores superpuestos rotan en sentidos opuestos
dimensiones máximas: $W = 8,5 \text{ m}$; $L = 28 \text{ m}$ (3600 t/d)
- entrada de coseta por medio de espirales perforadas, por la parte inferior y entrada de agua por el punto más elevado, fluyendo por gravedad en dirección contraria al movimiento de las cosetas y abandonando el difusor por la parte inferior como jugo bruto
- el difusor se encuentra encamisado, empleándose vapor para su calentamiento

Difusor BMA:



a) cinta transportadora de coseta; b) tanque de coseta; c) calentador de jugo; d) desarenador; e) torre de difusión; f) agua de prensado de pulpa; g) agua; h) bomba de jugo; i) bomba de coseta; k) Bomba de jugo de difusión.

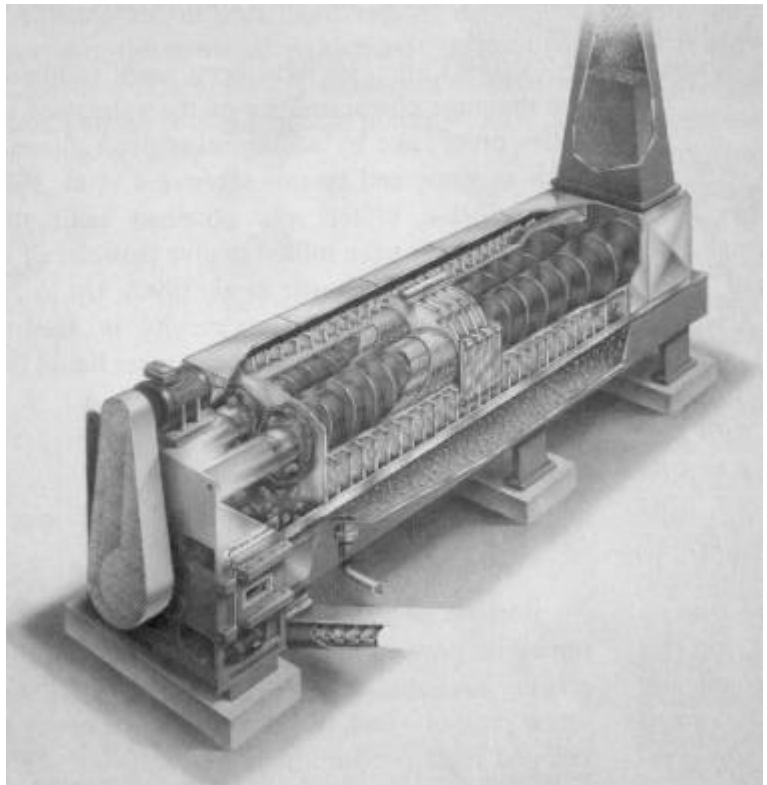
- dos partes fundamentales: mezclador contracorriente
torre de extracción
- mezclador contracorriente: mezcla de coseta y jugo de difusión, precalentamiento de coseta
- torre de extracción: tanque vertical con un eje vertical rotatorio con brazos convectoros que mueven las cosetas hacia arriba mientras el jugo presenta un movimiento descendente
dimensiones máximas: $D = 11 \text{ m}$; $L = 21,6 \text{ m}$ (10 000 t/d)
- filtro en la parte inferior de la torre, en la que se separa el jugo de las cosetas.
- entrada de agua fresca y salida de coseta agotada por la parte superior de la torre

- **Tratamiento de coqueta agotada (*pulpa*):**

○ **prensado de pulpa**

- ◆ **pulpa agotada que abandona el extractor: 8 – 10 % MS**
- ◆ **eliminación de agua generalmente mediante prensado hasta un 30 – 32 % MS**
- ◆ **variables de operación: tiempo de prensado, adición de coadyuvantes de prensado (lechada de cal, etc...), etc...**

◆ **equipo:**



○ **secado**

- ◆ **aumento desde 25 – 30 hasta 85 – 90 % % MS:**
- ◆ **requerimiento energético muy elevado:**
- ◆ **equipo: secaderos rotatorios**

- **Depuración:**

- **objetivos: eliminar no-azúcares presentes en el jugo de difusión:**

- * **pectina**
- * **proteínas, amidas**
- * **sales de calcio insolubles**
- * **azúcar invertido**

obtener jugos estables y de elevada pureza

evitar hidrólisis de sacarosa (glucosa + fructosa)

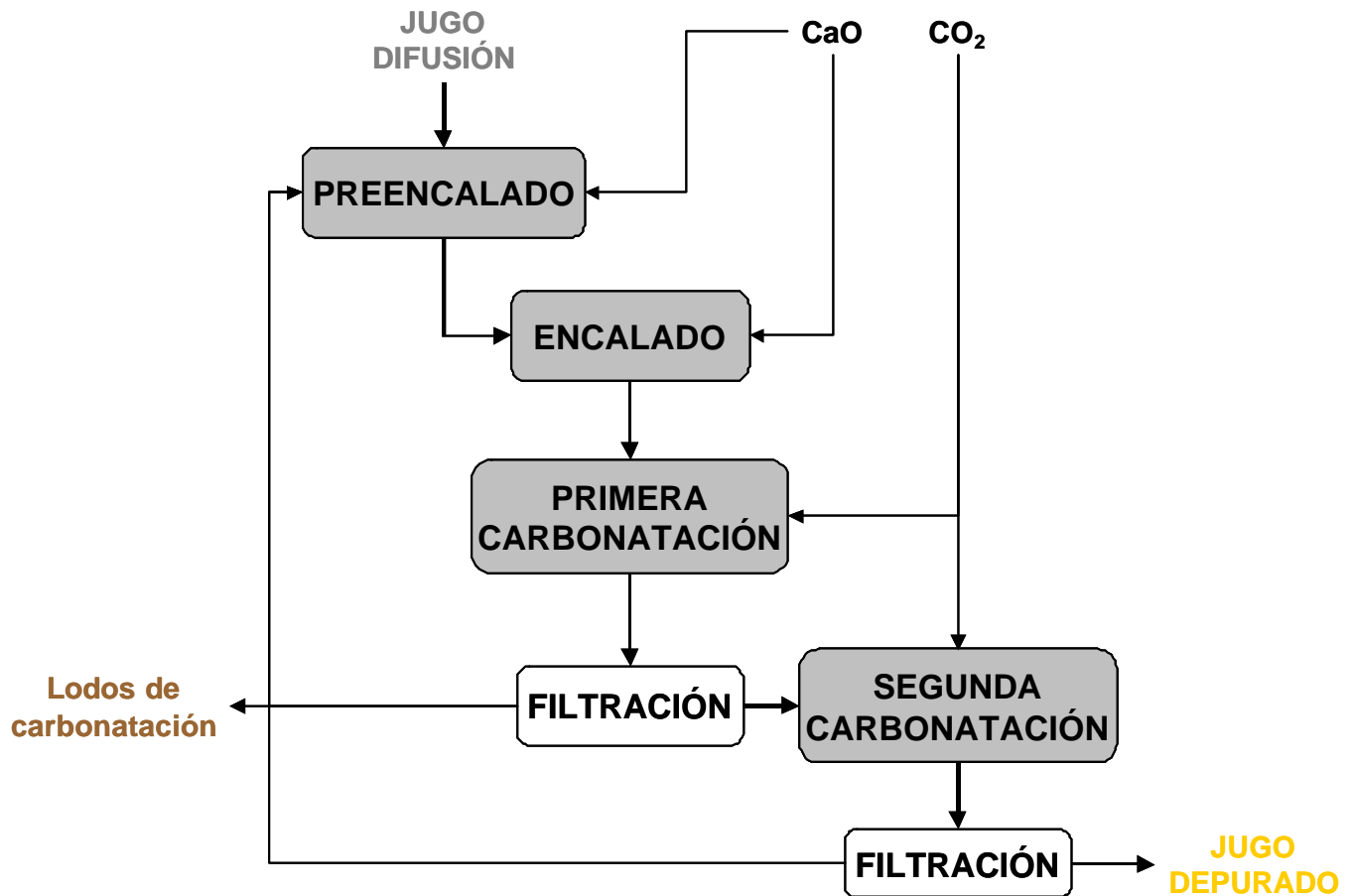
- **utilización de reactivos químicos, principalmente óxido de calcio y dióxido de carbono**

- ***Proceso de Depuración Calcocarbónica:***

- **reacciones implicadas:**

- ◆ **interacciones iónicas con calcio: precipitación de sales indolubles**
- ◆ **transformación y/o destrucción de amidas y azúcares reductores**
- ◆ **adsorción sobre la superficie de carbonato cálcico**
- ◆ **coprecipitación de sales de calcio parcialmente solubles**

○ etapas:

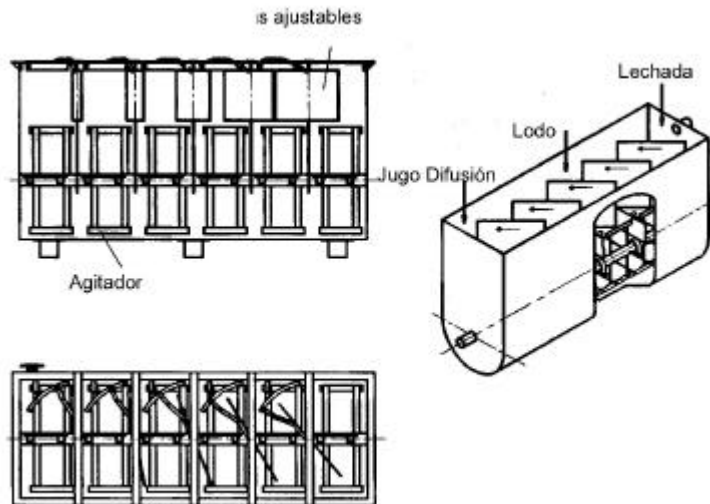


- ♦ **preencalado:** formación de sales de calcio insolubles, precipitación de materia coloidal, adición de pequeñas cantidades de cal (0,2 – 0,25 % CaO), lento y progresivo aumento de la alcalinidad
- ♦ **encalado:** eliminación de no-azúcares, favoreciendo las reacciones de degradación y aporte de un exceso de cal (1 – 2 % CaO)
- ♦ **primera carbonatación:** eliminación del exceso de cal y adsorción de no-azúcares sobre el precipitado formado
- ♦ **segunda carbonatación:** descalcificación del jugo depurado

- **Preencalado**

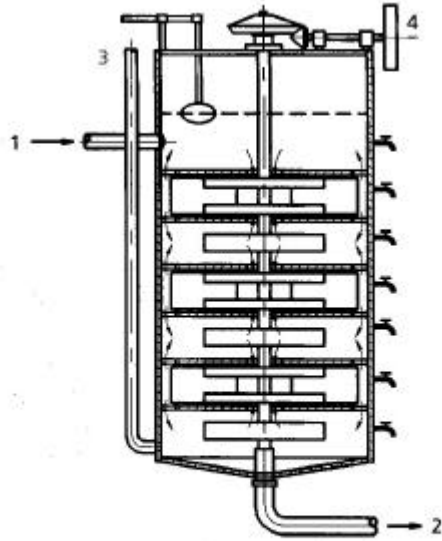
o **equipo:**

♦ **preencalador horizontal**



- **depósito horizontal en forma de U, separado en seis compartimentos**
- **agitador horizontal provisto de seis paletas, siendo el sentido de giro del agitador el mismo que la posición de las compuertas**
- **entrada de Jugo de Difusión por un extremo, fluyendo por gravedad hacia el otro extremo, por el que abandona el depósito como jugo preencalado**
- **adición de lechada de cal en el último compartimento y distribución en sentido contrario al del jugo, ayudado por la posición de las compuertas.**

♦ **preencalador vertical**

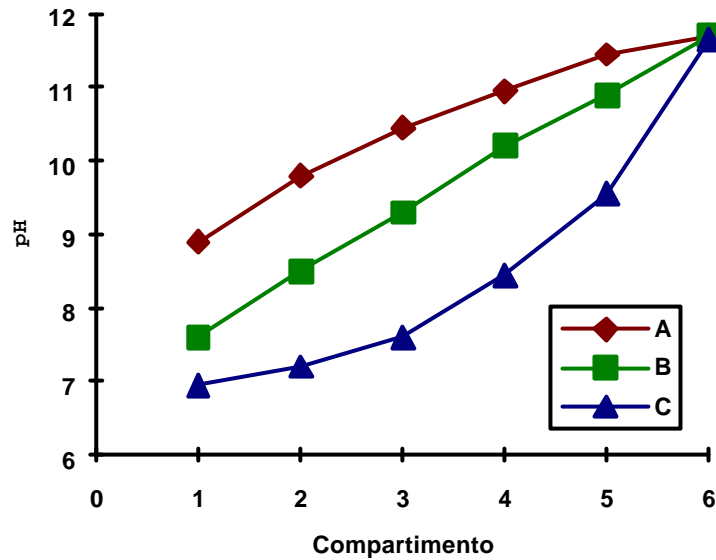


1. entrada de jugo; 2. salida de jugo; 3. entrada lechada de cal; 4. motor agitador

- **tanque vertical y cilíndrico, separado en varios compartimentos mediante platos**
- **en celdas alternas, se disponen paletas**
- **sentido de flujo del Jugo de Difusión es desde la parte superior hacia la inferior del depósito**
- **el flujo inverso de la lechada de cal se consigue mediante el movimiento centrífugo del jugo y la velocidad de rotación de las paletas.**

○ **variables de operación:**

- ◆ **curva de pH: gradiente de pH adecuado para favorecer la estabilización de los flóculos formados**



- ◆ **pH final del jugo preencalado: punto óptimo de floculación de coloides y proteínas, depende de la calidad de la remolacha (10,8 – 11,2)**

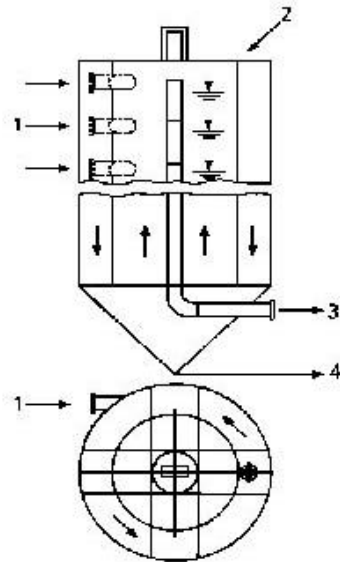
- ◆ **tiempo de permanencia y temperatura:**

<i>T</i> (°C)	<i>t</i> (min)
35	25 – 30
50 - 60	20 – 25
> 72	< 15

- ◆ **recirculación de lodos de carbonatación: facilita la estabilización de flóculos formados, empleo de la mínima cantidad posible**

- **Encalado**

- **equipo: depósitos cilíndricos con o sin agitación externa**



1. Entrada Jugo Preencalado; 2. Venteo; 3. Salida Jugo Encalado; 4. Purga.

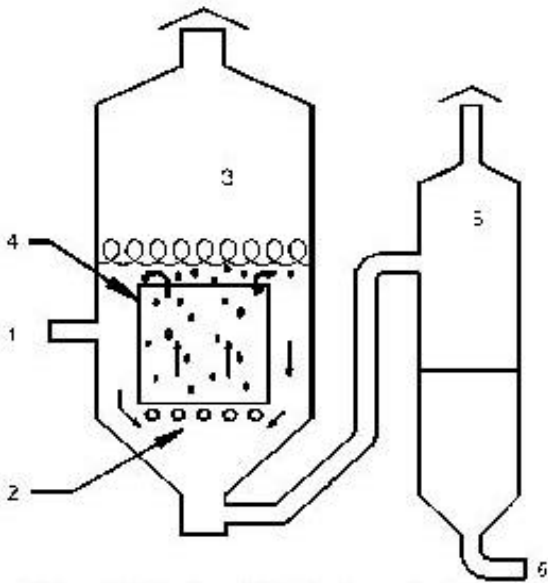
- **variables de operación:**

- ◆ **cantidad de cal adicionada: Factor de cal**
- ◆ **tiempo de permanencia: suficiente para completar reacciones de degradación, función de la temperatura:**

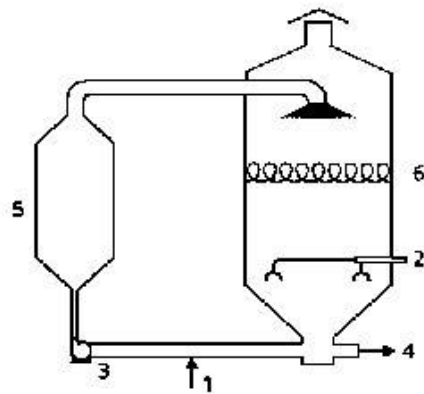
	T (°C)	t (min)
Encalado frío	30 - 60	60 - 40
Encalado caliente	85	10 - 20

- **Primera Carbonatación**

- o **equipo: con o sin recirculación**

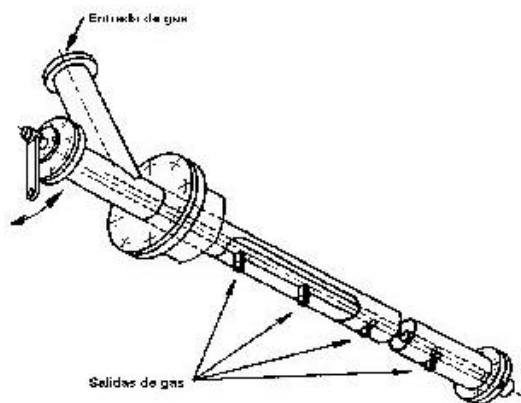


1. Entrada de jugo; 2. Distribuidor de gas (tuber Richter); 3. Tanque de carbonatación;
4. división entre cámara de burbujeo y recirculación; 5. Tanque de reacción;
6. Salida y filtro.



1. Entrada jugo; 2. Entrada de gas a distribuidor; 3. Bomba de Recirculación;
4. Salida lodo de carbonatación; 5. Tanque de reacción; 6. Nivel de jugo

- ♦ **utilización adecuada del dióxido de carbono (distribuidor de gas eficiente):**



- **variables de operación:**
 - ◆ **velocidad de gasificación (transporte de CO₂)**
 - ◆ **alcalinidad final del jugo: 0,08 – 0,1 % CaO**
 - ◆ **temperaturas elevadas: 85 °C**
 - ◆ **tiempos de permanencia: 10 min**

- ***Segunda Carbonatación:***
 - **equipo: similar al empleado en primera carbonatación**

 - **variables de operación:**
 - ◆ **velocidad de gasificación (transporte de CO₂)**
 - ◆ **alcalinidad final del jugo: 0,015 – 0,020 % CaO**
 - ◆ **temperaturas elevadas: 85 - 90 °C**
 - ◆ **tiempos de permanencia: 10 min**

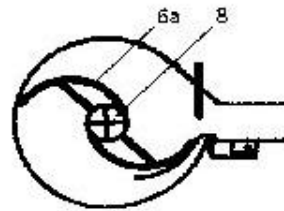
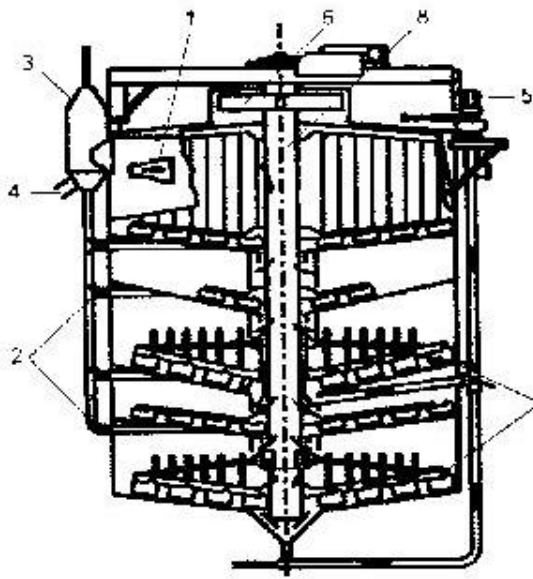
- ***Separación lodos de carbonatación***
 - **clarificación del jugo (eliminación de sólidos en suspensión)**

 - **concentración lodos**

 - **equipo:**
 - ◆ **decantadores: separación por gravedad: clarificador Dorr**

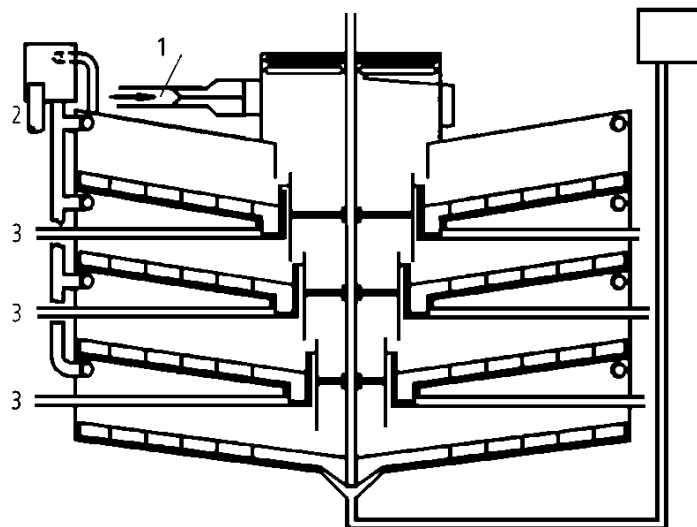
 - ◆ **filtros: mangas, rotatorios a vacío, prensa**

DECANTADOR TIPO DORR



Clarificador Dorr

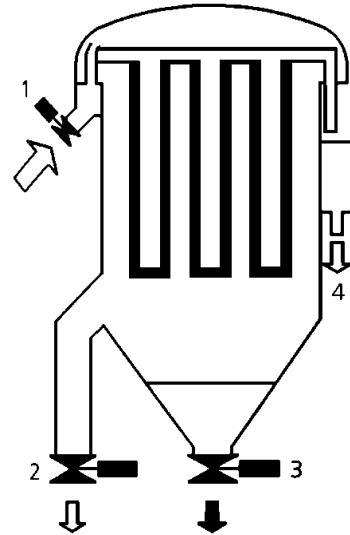
- 1. Entrada de jugo; 2. Salida de jugo clarificado de cada compartimento; 3. rebose;
- 4. salida principal de jugo clarificado; 5. bomba de lodo concentrado; 6. recogida de espumas;
- 7. rasquetas; 8. salida de lodo



Clarificador Dorr

- 1. entrada lodo de carbonatación; 2. salida de jugo clarificado;
- 3. salida de lodo concentrado

FILTRO DE MANGAS

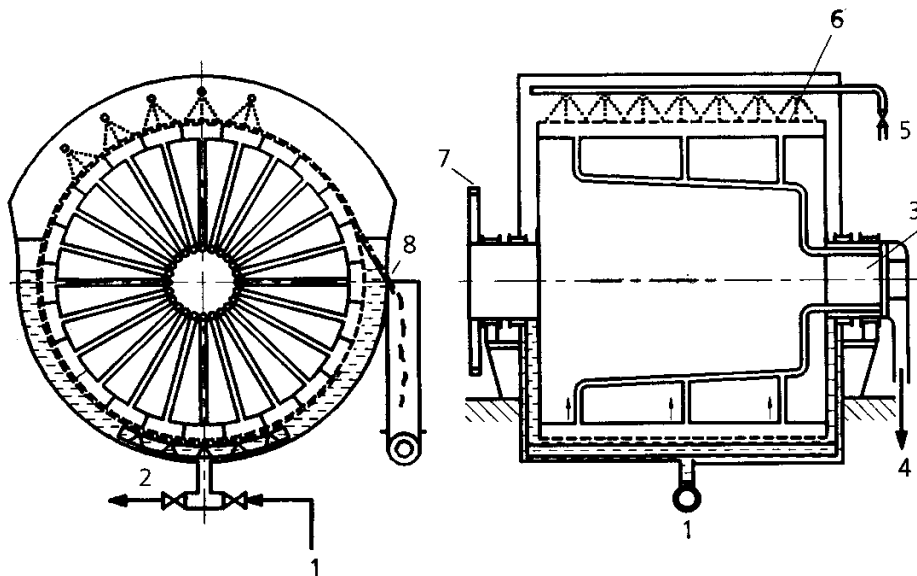


Filtro de mangas

1. entrada jugo carbonatado; 2. entrada líquido de lavado; 3. salida lodo concentrado; 4. salida líquido filtrado

Durante filtración, válvula 1 abierta y 2 y 3 cerradas. Durante limpieza, válvula 1 cerrada y 2 y 3 abiertas

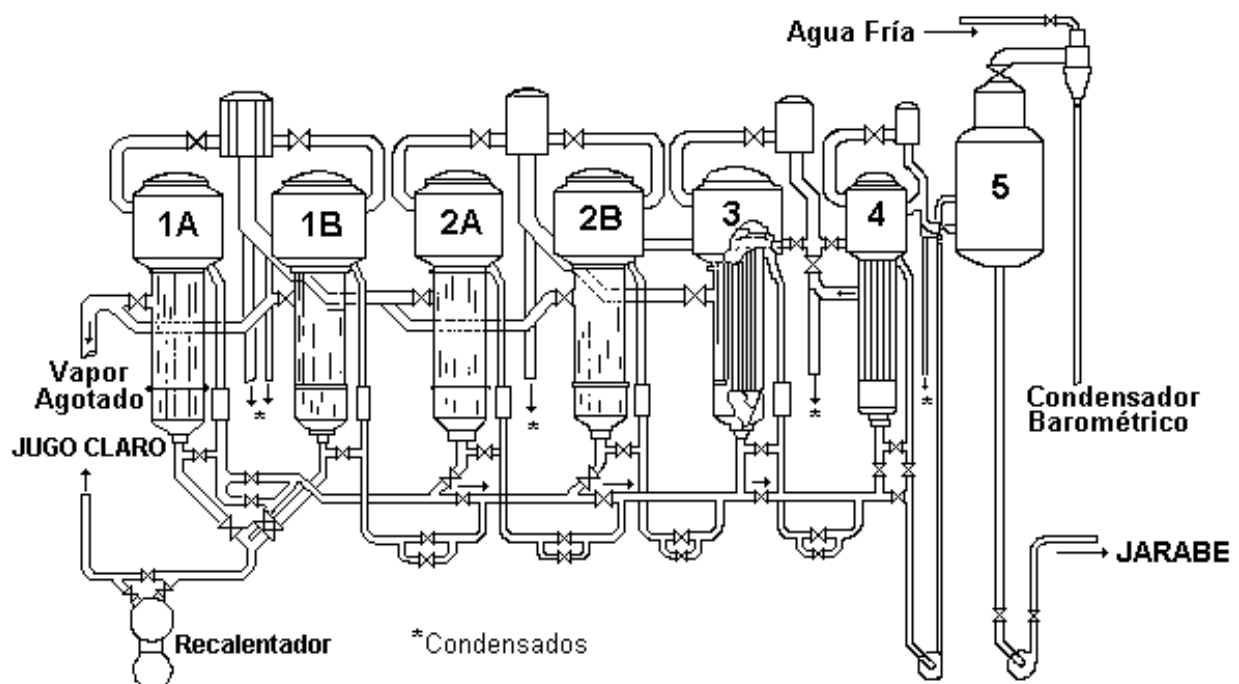
FILTRO ROTATORIO A VACÍO



Filtro rotatorio a vacío con múltiples compartimentos

1. entrada de lodo; 2. válvula de vaciado; 4. jugo filtrado; 5. agua de lavado; 6. tambor rotatorio y tela de filtración; 7. motor para giro del tambor; 8. eliminación de la torta de filtración

- **Evaporación: obtención de *jarabe***
 - **objetivo: aumentar el contenido en materia seca del jugo depurado mediante evaporación de una parte del agua que contiene hasta 50 – 65 % M.S.**
 - **Sistema de evaporación multiefecto para reducir el consumo de vapor**

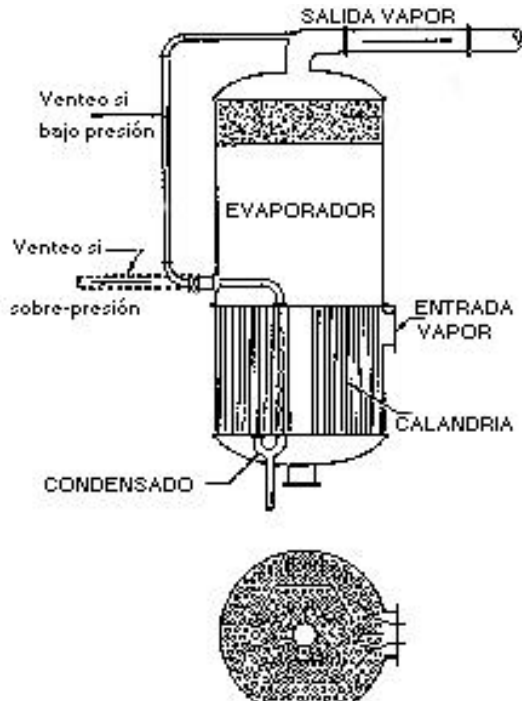


reducción progresiva de la presión de operación desde 2,5 bar en el primer efecto hasta 0,4 bar en el último

salida de vapor del último efecto puede realizarse mediante un sistema de vacío provisto de un condensador barométrico

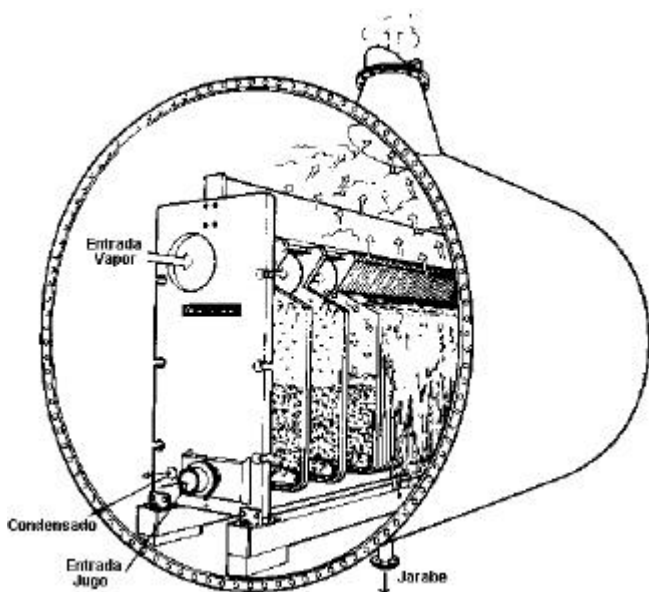
- **equipo:**

o **evaporador de calandria (Robert)**



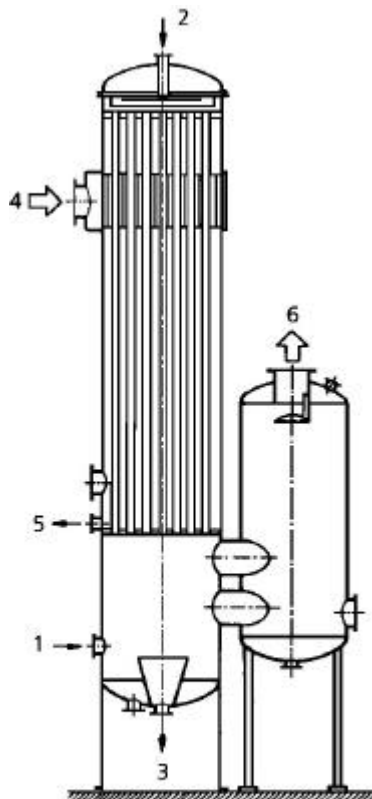
- carcasa cilíndrica vertical con platos en las partes superior e inferior
- haz de tubos (1.5-3 m de longitud y 38-50 mm de diámetro exterior),
- diámetro haz no supera la cuarta parte del diámetro total de la carcasa

o **evaporador de placas**

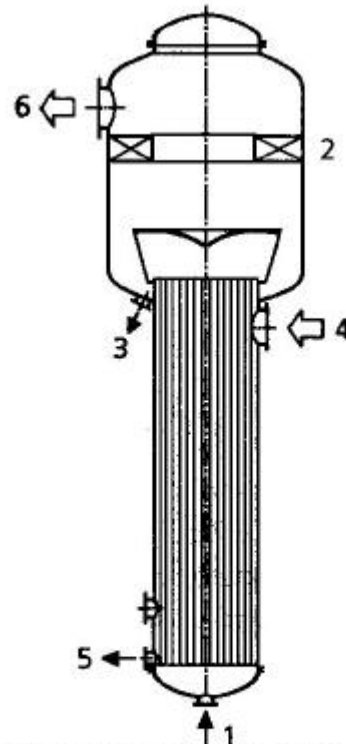


- una serie de placas (o platos), unidas mediante soldadura y juntas
- el jugo fluye entre las placas unidas por juntas, el vapor lo hace entre las unidas por soldadura.
- mayor superficie de intercambio de calor y menor tiempo de permanencia del jugo en el evaporador

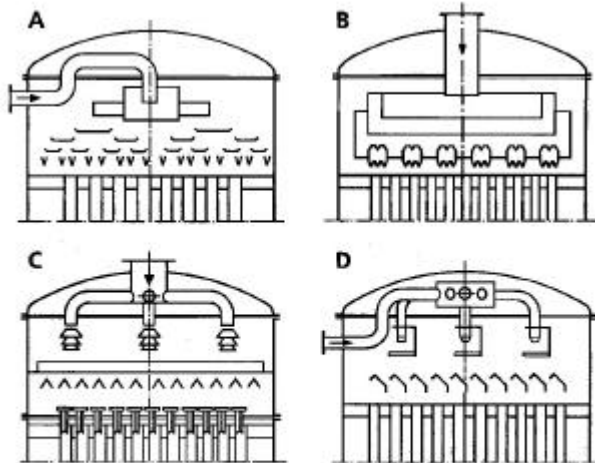
○ evaporador de película



1. entrada de jugo; 2. distribuidor de jugo;
3. salida de jugo; 4. entrada vapor calefacción;
5. condensados; 6. salida vapor



1. entrada de jugo; 2. separador de entrada;
3. salida de jugo; 4. entrada vapor calefacción;
5. salida condensados; 6. salida vapor

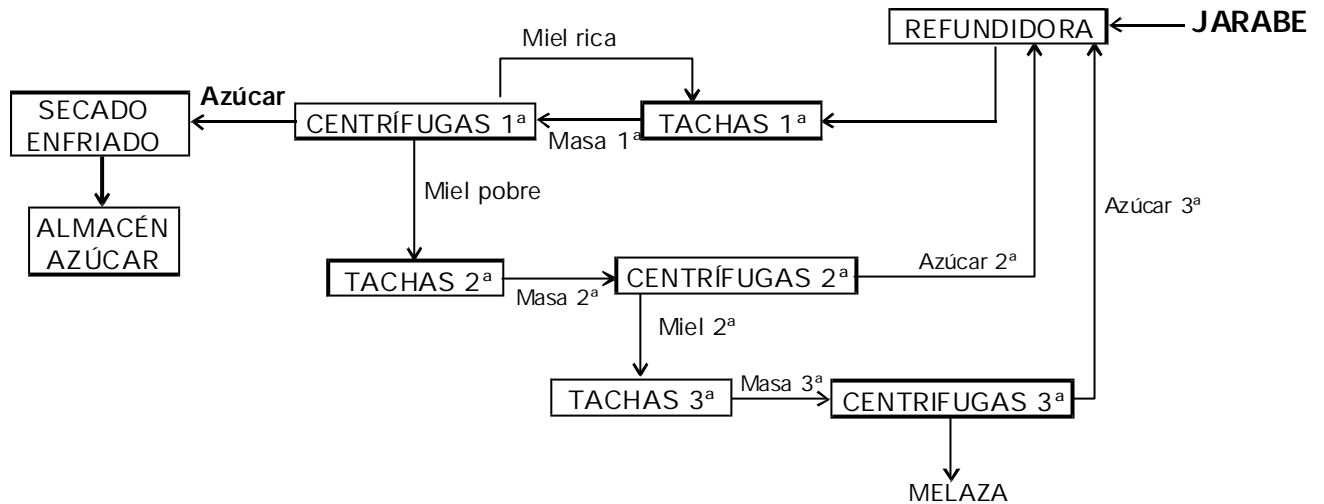


Juice distribution devices employed in falling-film evaporators
A and B Circular systems; C Bars and tube inserts under nozzles;
D Baffles under nozzles with adjustable trays

- consta de tubos verticales (6.5-10 m de longitud y 38 mm de diámetro externo) de dos tipos en función del sentido de flujo del vapor y del jugo: película ascendente y película descendente
- el jugo circula por el interior de los tubos y el vapor por el exterior de los mismos.

- **Cristalización:**

- **objetivo: cristalizar el azúcar contenido en el jarabe de evaporación**
- **esquema para la obtención de tres productos:**



- **Primera cristalización:**

- **en tachas discontinuas: evaporación a baja temperatura hasta sobresaturación, siembra y crecimiento del cristal controlando sobresaturación mediante el vacío y la temperatura**
- **centrifugación del primer producto, para obtener azúcar y una miel de primera**

- **Segunda cristalización:**

- **en tachas continuas: obtención de azúcar de segunda que mediante centrifugación proporciona azúcar de segunda y miel de segunda**

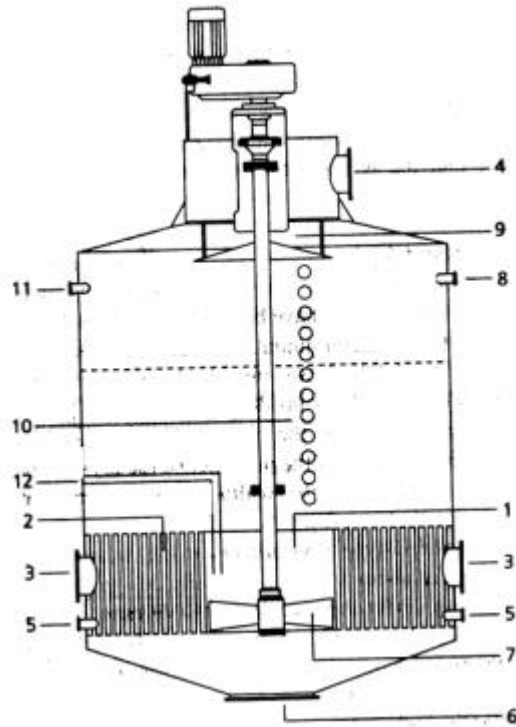
- **Tercera cristalización:**

- **en tachas continuas: obtención de azúcar de tercera que mediante centrifugación proporciona azúcar de tercera y melaza**

- variables de operación:

○

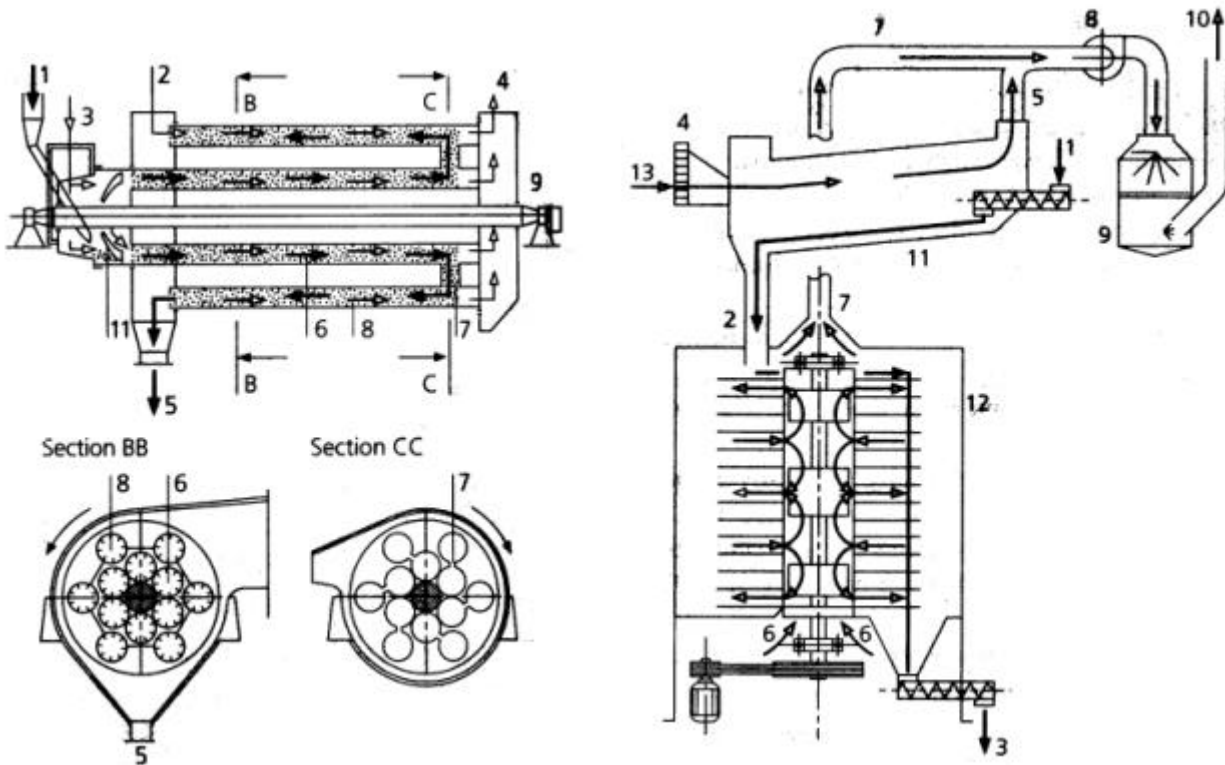
- equipo: tacha discontinua de primera



1. espacio central; 2. calandria; 3. entrada de vapor; 4. salida de vapor de cristalización; 5. salida de condensado; 6. salida de la masa cocida; 7. agitador; 12. entrada de jarabe

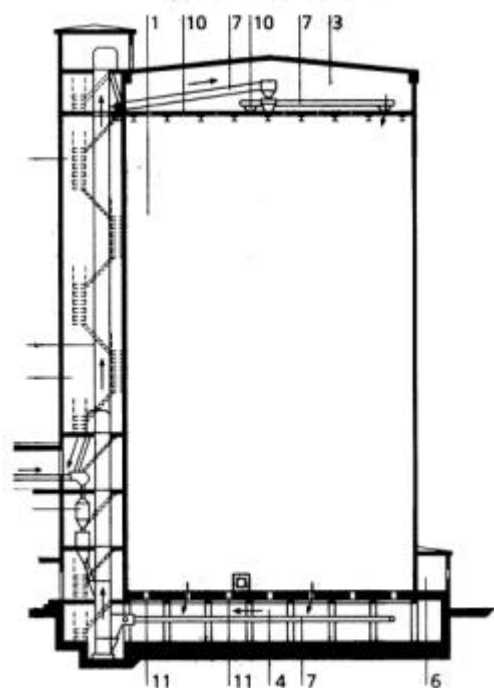
- **Secado:**

- **objetivo:** reducir la humedad del azúcar por debajo del 0,2 %
- **equipo:** secadero horizontal de tambor rotatorio o vertical de bandejas:



- **Almacenamiento: en silos**

1. espacio para almacenamiento de azúcar;
2. torre para elevación del azúcar;
6. planta de acondicionamiento de aire;
7. transporte de azúcar (cintas,...);
8. elevadores;
9. escaleras;
10. entrada de azúcar;
11. salida de azúcar



- **Calidad del azúcar:**

- puntos europeos: polarización, cenizas, color tipo, color en solución. Los puntos totales se determinan mediante la expresión:

$$\text{Puntos totales} = \text{CT} + \text{CS} + \text{C} \leq \text{valor}$$

color tipo (CT): comparación con patrones

color en solución (CS) y cantidad de cenizas (C) mediante análisis estándar.

- legislación española / europea: humedad, azúcares reductores, metales pesados
- clientes: test de limpieza, dióxido de azufre

Calidad	Color tipo	Color solución	cenizas	Puntos totales	Pol (%)	Az. Invertidos	Humedad (%)	SO ₂ (mg/kg)
1	≤ 4	≤ 3	≤ 6	≤ 8	≤ 99,7	≤ 0,004	≤ 0,006	15
2	≤ 9	≤ 6	≤ 15	≤ 22	99,7	0,004	0,006	15
3	12				99,7	0,004	0,110	15

- calidad 1: azúcar refinado
- calidad 2: azúcar blanquilla
- calidad 3: azúcar comercial para otras aplicaciones en las que se requieren cantidades elevadas (pastelerías, refrescos, etc...)