

TECNOLOGÍA DE CEREALES

2º Curso de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

Notas de los temas 5 a 8

Profesor: Miguel García Román

Dpto. de Ingeniería Química

Facultad de Ciencias

Universidad de Granada

Tema 1

INTRODUCCIÓN AL PROCESAMIENTO DE CEREALES

Aunque existan variaciones en función de la especie que se trate, en la práctica totalidad de ellas los granos de cereal están protegidos en su planta de origen por una cubierta o vaina. A su vez, cada grano está conformado básicamente por cuatro componentes: el germen, el interior feculento, que representa la mayor parte del grano, las capas exteriores provistas de nutrientes y la cáscara de naturaleza fibrosa. Tanto la vaina protectora como cada una de las partes del grano dan lugar, tras el procesamiento, a diferentes productos destinados al consumo humano o animal, siendo los primeros los que requieren un procesado más completo, ya que el ser humano no puede digerir adecuadamente ni los granos crudos ni las harinas obtenidas de los mismos.

Si bien cada tipo de cereal requiere de un tratamiento específico, hay algunos principios de carácter general que pueden ser aplicados. Así los cereales pasan por distintas etapas en una gran, y a veces compleja, cadena que se inicia en la cosecha y termina en el consumo. Esta cadena, que se conoce como sistema poscosecha, se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 1.1. Comprende básicamente tres bloques separados: el primero cubre desde la cosecha hasta el almacenado del grano, y engloba todas las operaciones que permiten extraer y estabilizar el grano de cereal; el segundo, denominado *procesado preliminar*, comprende aquellas operaciones que permiten obtener productos intermedios, fundamentalmente harinas, que no pueden ser consumidos directamente por el hombre; el tercero, o *procesamiento secundario*, lo forman aquellas operaciones que transforman los productos intermedios en finales (por ejemplo, la fabricación de pan). Las operaciones que incluidas en el procesado secundario pueden ser industriales o domésticas.

En este tema describiremos las etapas iniciales de procesamiento de los cereales, empezando por su recolecta, y terminando en su almacenamiento en condiciones de estabilidad.

1. Recolecta, Trilla y Aventado.

La planta de cereal se recolecta completa, por lo que en primer lugar es necesario separar el grano del resto de sus partes. La separación se lleva a cabo mediante dos operaciones sucesivas: la trilla y el aventado.

La **trilla** consiste en la extracción de los granos. En el sistema tradicional, las gavillas de trigo, una vez recolectadas, se extienden en el suelo, en un área de superficie dura especialmente preparada para ello, llamada *era*. Allí son pisadas por hombre o animales, directamente o bien mediante el *trillo*, una plancha de madera con piedras (lascas de pedernal) o cuchillas en su cara interior, de manera que los granos se desprenden de la espiga. También se consigue la separación de los granos golpeando las gavillas contra una superficie dura, aunque este sistema es menos eficaz.

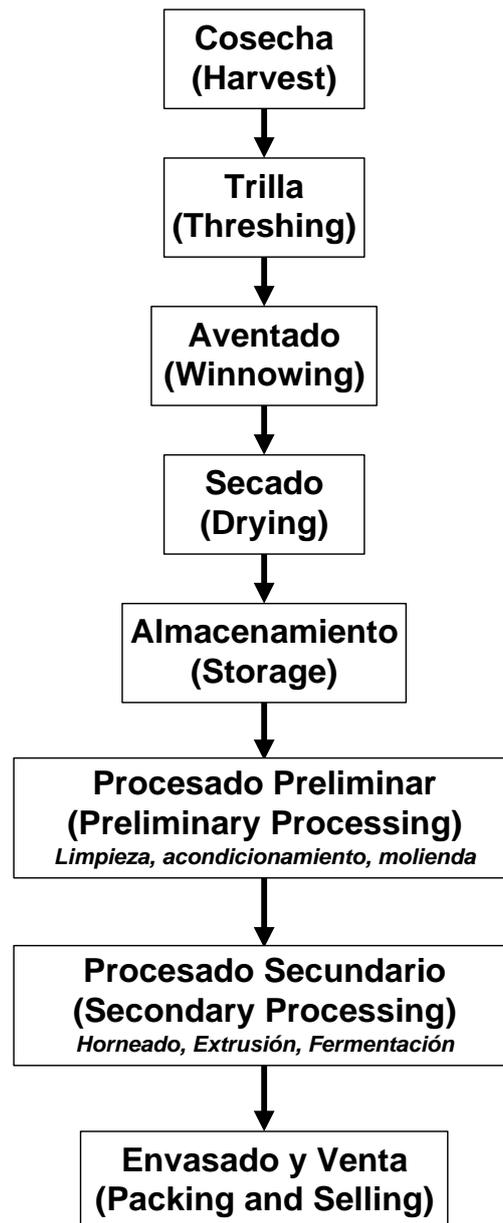


Figura 1.1. Tratamiento poscosecha de los cereales.

Tras la trilla los granos continúan mezclados con los restos de la planta, que constituyen la *paja*, por lo que es necesario separarlos. Para ello se realiza el **aventado**, que consiste en lanzar al aire

la mezcla de granos y paja, siendo esta última arrastrada por el viento, mientras que los granos se depositan en el mismo sitio.

Este sistema tradicional fue sustituido progresivamente por trilladoras mecánicas accionadas a pedal o mediante motores diesel, como la que se muestra en la Figura 1.2, y en las que se realizan simultáneamente las operaciones de trilla y aventado.

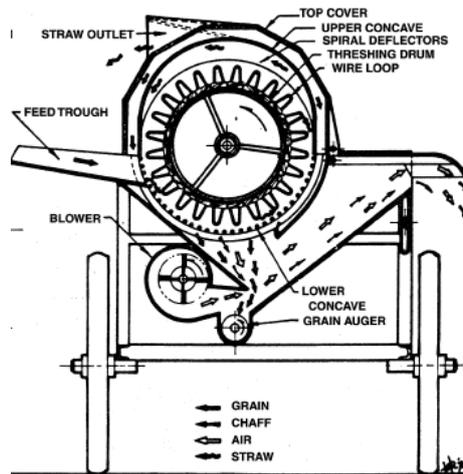


Figura 1.2. Representación esquemática de una trilladora mecánica (Dendy, 2001).

El grano es separado de las gavillas al ser éstas golpeadas mediante un cilindro erizado de púas. El motor que acciona el cilindro mueve también un ventilador que genera la corriente de aire necesaria para el aventado. El grano es recolectado por la parte inferior mediante un tornillo sin fin, mientras que la paja más menuda es arrastrada por el aire.



Figura 1.3. Trilladora mecánica. Se muestran detalles de los sistemas de alimentación y cribado (Wintersteiger, 2009)

En la Figura 1.3 se presenta una moderna trilladora estática, cuyo mecanismo de funcionamiento es similar al anterior, si bien, tal y como puede apreciarse en la figura, consta de un sistema de alimentación mediante cinta transportadora y de unas placas cribadoras para la separación del grano de la paja.

Las modernas cosechadoras son capaces de realizar todas las operaciones de cosecha, trilla y aventado, e incluso de ensacar la paja, reduciendo drásticamente la mano de obra necesaria para la recolecta de los cereales. Una fotografía de estas máquinas agrícolas se muestra en la Figura 1.4.



Figura 1.4. Cosechadora mecánica moderna (Massey-Ferguson, 2009).

Una vez separados los granos de cereal de la planta, y dado que éstos no pueden ser consumidos o procesados de forma inmediata, se hace necesario su almacenamiento, antes de proceder a su tratamiento preliminar o a su consumo directo, en los casos en que esto es posible. Por ello el almacenamiento de los granos en condiciones adecuadas ha sido desde la antigüedad y continúa siendo una importante necesidad para el hombre. Se pretende de esta forma evitar pérdidas que siempre se derivan del hecho de que otros seres vivos (roedores, insectos y microorganismos) compiten con el hombre para utilizar el alimento que los granos contienen.

2. Secado.

El secado de los granos tiene por objeto reducir el nivel de humedad en los mismos, por debajo de un nivel considerado de seguridad, lo cual contribuye a garantizar su conservación, al impedir tanto su germinación como el crecimiento de microorganismos.

El nivel de seguridad para el almacenamiento de cereales es del 13 al 15% de humedad, para periodos de almacenamiento de hasta un año, y del 11 al 13% para periodos de más de un año, aunque depende del tipo de cereal (ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Humedades máximas para el almacenamiento de cereales.

Cereal	Contenido máximo de humedad, %
Trigo	13.5
Maíz	13.5
Arroz en cáscara	15.0
Arroz Pelado	13.0
Sorgo	13.5
Mijo	16.0

Obviamente, en cuanto las condiciones ambientales cambian el equilibrio se rompe, y el grano puede volver a ganar humedad. En principio se asume que, una vez secado hasta los niveles de humedad indicados en la Tabla 1.1, el grano de cereal no absorbe agua nuevamente o lo hace en cantidades que no comprometen su conservación. Sin embargo, la absorción de agua puede ser especialmente problemática cuando el grano se almacena en condiciones de elevada humedad absoluta, tales como las que se dan en climas tropicales. Por el contrario, en climas fríos de montaña, donde incluso a elevadas humedades relativas existe poca cantidad de agua en el aire, los granos pueden almacenarse temporalmente con un nivel de humedad mayor del 20%.

Dado que el agua se sitúa tanto en el interior como en la superficie de los granos, durante el secado de los mismos se dan dos etapas diferentes:

1. La evaporación del agua superficial, hasta alcanzar el equilibrio con el ambiente.
2. El transporte por difusión del agua desde el interior del grano hasta la superficie, para reponer a la evaporada. Esta etapa se prolonga hasta que el interior, superficie y ambiente se hallan en equilibrio en cuanto a su contenido de agua.

Tradicionalmente el secado se llevaba a cabo dejando los granos o las gavillas al sol, en áreas especialmente acondicionadas para ello. Este sistema, que tiene la ventaja de que es más respetuoso con el medio ambiente y no genera gastos de combustible (aunque sí para el acondicionamiento del área), tiene sin embargo tres importantes desventajas:

- Depende completamente de la climatología.
- No permite controlar el secado.
- Es difícil impedir el robo de grano por los pájaros.

Por estas razones se va extendiendo cada vez más el secado mecánico, que puede realizarse en dos tipos diferentes de equipos:

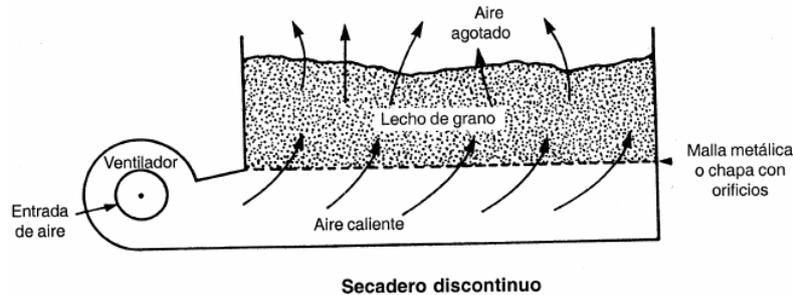


Figura 1.5. Equipo para secado de funcionamiento discontinuo (Dendy, 2001).

- Equipos de funcionamiento discontinuo: Se coloca una capa de sólidos sobre una placa perforada, a través de la cual se hace circular aire caliente. Los granos pueden situarse formando un lecho fijo (el volumen del mismo viene limitado por unas placas soporte) o un lecho fluidizado (en caso contrario). El aire se calienta usando un combustible de tipo fósil (diesel, carbón) o incluso la propia paja y cáscaras de los granos. Este tipo de secadores, que trabajan por lotes, pueden usarse para cantidades de grano de 0.5 toneladas en adelante. Su construcción es barata (se puede usar acero, hormigón e incluso ladrillo), pero no son muy eficientes desde el punto de vista energético e incluso pueden causar pérdidas de grano (sobrecalentamiento de las capas inferiores). Además precisan de bastante mano de obra en las operaciones de carga y descarga. Un esquema simplificado de los mismos se muestra en la Figura 1.5.
- Equipos de funcionamiento continuo: En ellos el grano es alimentado y secado de forma continua. Se trata de grandes columnas en las que el grano es alimentado por la parte superior y extraído por la inferior, una vez reducido su contenido de humedad. La parte central de la columna dispone de un quemador y un ventilador o soplante, que es la que impulsa el aire caliente hacia el anillo exterior, que es por donde circulan los granos. Pueden funcionar de dos formas diferentes: sin mezcla o con mezcla. En el primer caso, representado en la Figura 1.6 (izquierda), los granos van descendiendo lentamente, pero sin mezclarse apenas, mientras el aire caliente circula a través de ellos. Como la misma capa de grano es la que entra en contacto en primer lugar con el aire caliente, sigue existiendo peligro de pérdida de grano por sobrecalentamiento. El funcionamiento con mezcla, en cambio, introduce una serie de tabiques o bandejas que van mezclando el grano, cambiando su posición e impidiendo el fenómeno anterior (ver Figura 1.6, derecha). En la Figura 1.7 se incluye también la imagen de un equipo industrial de secado continuo, con mezclado.

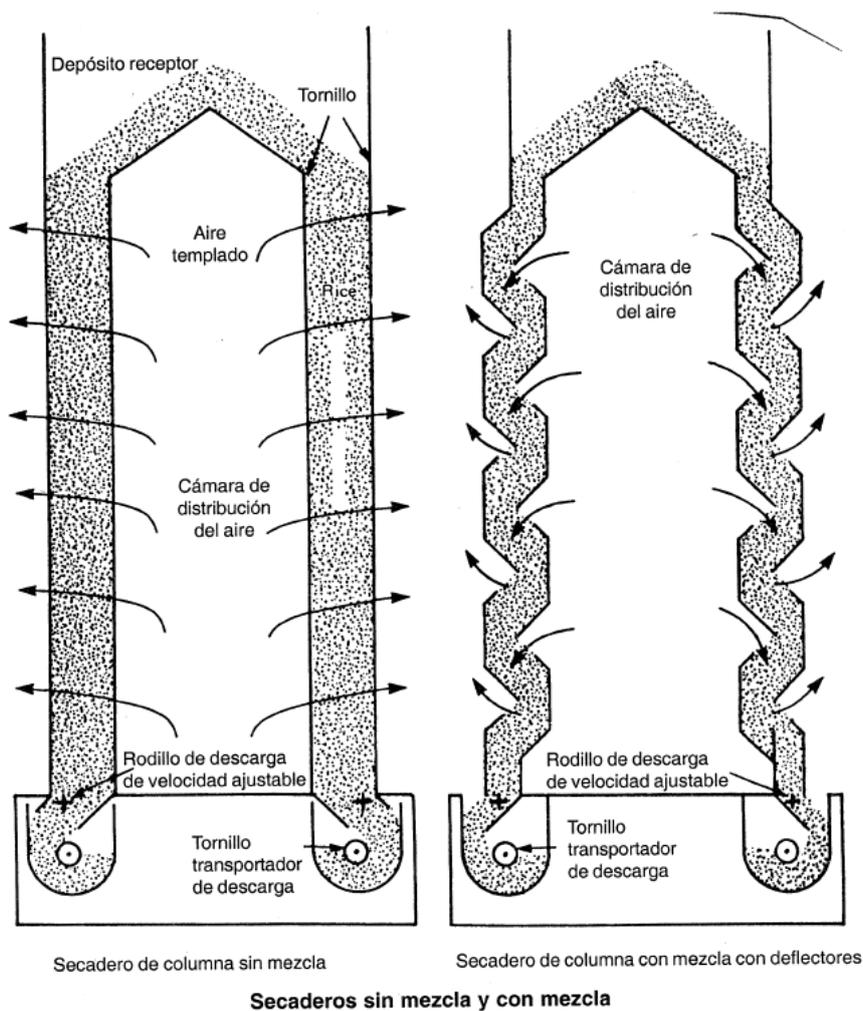


Figura 1.6. Equipos para secado en continuo. Izquierda: equipo sin mezcla; Derecha: equipo con mezcla (Dendy, 2001).

Las operaciones de secado aquí descritas son especialmente importantes para ciertos cereales, como el arroz. En el secado del arroz un importante problema es la rotura de los granos debido a tensiones generadas por el secado, ya que este produce, especialmente si es muy rápido, una súbita compresión o encogimiento del grano, lo que origina tensiones que pueden causar su ruptura. Por ello el secado del arroz se realiza en varias etapas, con tiempos de espera intermedios de 4 a 24 horas. En cualquier caso, un calentamiento demasiado intenso durante el secado puede ocasionar pardeamiento (Maillard) y, en el caso del trigo, daños al gluten.

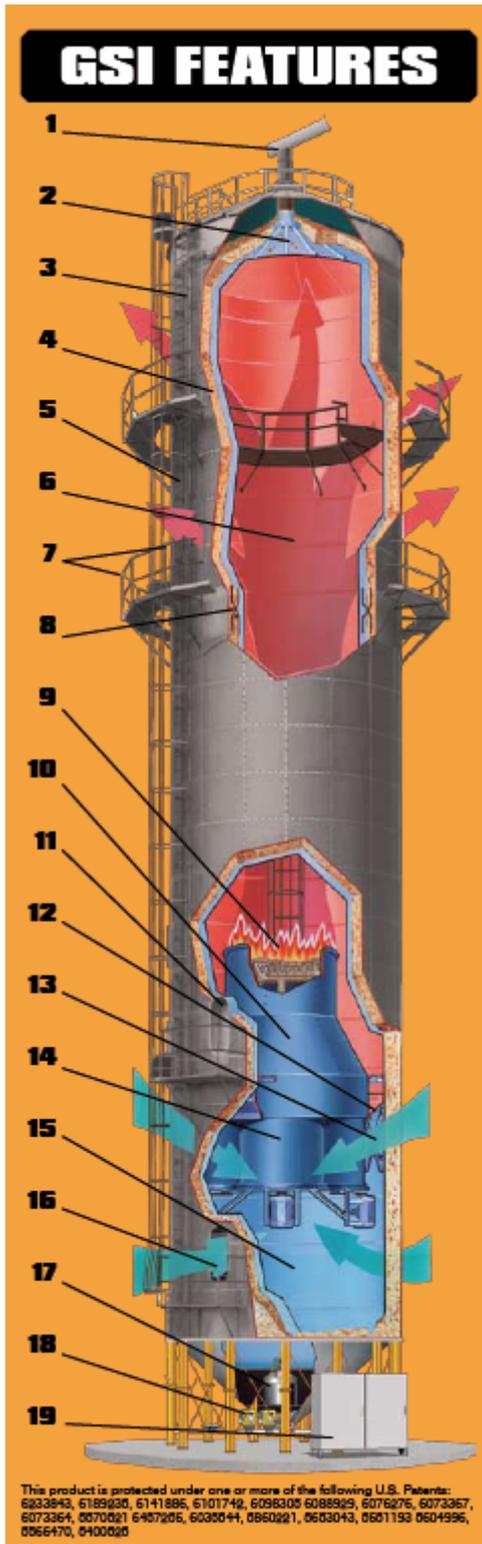


Figura 1.7. Torre comercial para secado de cereal en continuo y con mezcla (GSI Grain Systems, 2009).

3. Almacenamiento.

El almacenamiento del grano se lleva a cabo tanto a pequeña/media escala, en la propia granja o en las instalaciones de procesamiento, como a gran escala, en los grandes centros de distribución y comercialización.

A parte de los sistemas de almacenamiento tradicionales, y aún en uso en muchos países en vías de desarrollo, el grano puede ser almacenado en bruto, en grandes depósitos verticales u horizontales (estos últimos menos habituales), o bien ensacado y los sacos convenientemente apilados, conservados en almacenes bien sellados y generalmente contruidos de hormigón. Sin embargo, el ensacado del grano es poco utilizado, salvo en los países en desarrollo.

Para el almacenamiento del grano en bruto, el sistema más utilizado son los grandes depósitos cilíndricos verticales conocidos como **silos**, cuya forma esquematizada se muestra en la Figura 1.8.

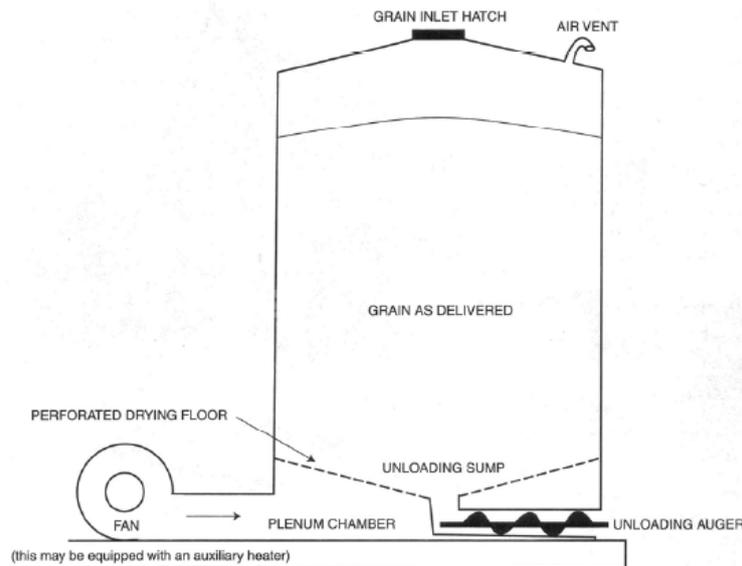


Figura 1.8. Esquema de un silo vertical equipado con un sistema de ventilación/calentamiento (Dendy, 2001)

En la actualidad los silos son contruidos en acero u hormigón y pueden albergar hasta 15000 toneladas. Los silos de acero, de uso muy frecuente, se contruyen mediante la unión de placas de acero corrugado y galvanizado, y normalmente disponen de una doble pared. Además, los silos deben contar con una serie de dispositivos adicionales, tales como:

- Bocas para el llenado y vaciado.
- Boca para inspección y limpieza.
- En algunas ocasiones cuentan también con un sistema de aireación consistente en un ventilador y opcionalmente un calefactor, situados en su base, que suministran una corriente de aire,

caliente o no, para secar los granos, o mantenerlos en unas condiciones adecuadas de humedad y temperatura.

Para elevar los granos hasta introducirlos en el silo se usan elevadores de cangilones (“bucket elevators”) y cintas transportadoras, que se describirán en el siguiente apartado.

Existen dos clases de silos de acero, que se diferencian en la forma del fondo de los mismos, así como en la forma de descarga.

- Silos convencionales, de fondo plano, como el representado en la Figura 1.8, en el que la descarga se produce mediante un tornillo sin fin situado en el fondo del mismo.
- Silos tolva (“hopper silos”), de fondo troncocónico, lo que permite su descarga como si de una tolva se tratara, abriendo la compuerta situada en su base. Permiten un menor diámetro y altura que los silos de fondo plano, lo que se traduce en una menor capacidad.

En la Figura 1.9 fotografías de ambos tipos de silos.



Figura 1.9. Silo convencional (fondo plano), izquierda, y silos tolva (“hopper silos”), derecha (GSI Grain Systems, 2009)

Tanto en las instalaciones de procesamiento como en las granjas suelen utilizarse al menos 2 silos, para dar mayor flexibilidad a las operaciones realizadas. Además la capacidad total suele estimarse como un 25% más de la requerida, para hacer frente a incrementos en el rendimiento de las cosechas o en la capacidad de producción de la industria de procesamiento.

Para elegir el tamaño de silo adecuado a la capacidad de almacenamiento prevista, a partir de los catálogos que suministran los de los fabricantes, y en general cuando se pretenden escoger sobre catálogo los diferentes equipamientos de la industria de procesamiento de cereales, es necesario manejar las unidades de medida que se utilizan tradicionalmente en este sector industrial.

Una unidad de medida frecuentemente utilizada en este ámbito, preferentemente en la literatura norteamericana, es el "bushel", que en su origen es una medida de capacidad volumétrica,

pero que hoy se utiliza para indicar peso de grano. Sin embargo, por la razón anterior, dependiendo de la densidad y del empaquetamiento del grano, no representa lo mismo un bushel de trigo, que uno de maíz o de cebada. En la Tabla 1.2 se muestran las equivalencias entre las unidades de medida de peso específico (masa-volumen) para distintos cereales.

Tabla 1.2. Peso específico (relación masa-volumen) para distintos cereales y en diferentes sistemas de medidas

Cereal	EEUU		EUROPA	
	lb/bushel	kg/bushel	kg/hL	kg/m ³
Maíz	56	25.4	72	720
Trigo	60	27.2	77	770
Arroz (blanco) medio	45	20.4	58	580
Sorgo	57	25.9	73	730
Cebada (con cáscara)	47	21.3	61	610

A partir de las equivalencias recogidas en la Tabla 1.2 es posible seleccionar sobre catálogo los silos necesarios para almacenar el grano para una determinada capacidad de producción, tal y como se lleva a cabo en el ejemplo siguiente.

Ejemplo de dimensionamiento y selección de silos sobre catálogo

Una harinera tiene una capacidad de molturación de 100 t por día de trigo. Si se pretende almacenar grano para asegurar el suministro para 15 días de producción, elegir el tamaño de silo necesario, teniendo también en cuenta que para flexibilizar la producción se van a instalar 2 silos. Realizar el diseño con un margen de seguridad del 25% frente a un posible aumento de la producción.

Capacidad total = 100 t/día * 15 días * 1.25 = 1875 t

Capacidad por silo = 1875 / 2 = 937.5 t

Capacidad por silo en bushels = 937.5*1000 kg / (27.2 kg/bushel) = 34467 bushels

Con este dato se puede buscar en catálogo el silo adecuado, si bien podrían existir diversas combinaciones diámetro altura que satisfagan estas necesidades.

Series	Dia.	Ring	Eave Height (Feet)	Peak Height (Feet)	Max Bu. Capacity	Max. (Cubic Feet)	Metric Tons 800 kg/m ³	Metric Tons 721 kg/m ³	Metric Tons 640 kg/m ³	Eave Height (Meters)	Peak Height (Meters)	Maximum Capacity (Cubic Mtrs.)
NCL	27	12	32'-2"	39'-7"	16647	19543	469	423	375	9.80	12.07	553
NCL	27	13	34'-10"	42'-3"	17934	21054	506	456	404	10.62	12.88	596
NCL	27	14	37'-6"	44'-11"	19221	22565	542	488	433	11.43	13.69	639
NCL	27	15	40'-2"	47'-7"	20508	24076	578	521	463	12.24	14.50	682
NCL	27	16	42'-10"	50'-3"	21795	25587	614	554	492	13.06	15.32	725
NCL	27	17	45'-6"	52'-11"	23082	27097	651	586	521	13.87	16.13	767
NCL	27	18	48'-2"	55'-7"	24369	28608	687	619	550	14.68	16.94	810
NCL	27	19	50'-10"	58'-3"	25656	30119	723	652	579	15.49	17.75	853
NCL	27	20	53'-6"	60'-11"	26943	31630	760	685	608	16.31	18.57	896
NCL	27	21	56'-2"	63'-7"	28230	33141	796	717	637	17.12	19.38	938
NCL	27	22	58'-10"	66'-3"	29517	34652	832	750	666	17.93	20.19	981
NCL	27	23	61'-6"	68'-11"	30804	36163	868	783	695	18.75	21.01	1024
NCL	27	24	64'-2"	71'-7"	32091	37674	905	815	724	19.56	21.82	1067
NCL	27	25	66'-10"	74'-3"	33378	39185	941	848	753	20.37	22.63	1110
NCL	27	26	69'-6"	76'-11"	34665	40695	977	881	782	21.18	23.44	1152
NCL	27	27	72'-2"	79'-7"	35952	42206	1013	913	811	22.00	24.26	1195

Series	Dia.	Ring	Eave Height (Feet)	Peak Height (Feet)	Max Bu. Capacity	Max. (Cubic Feet)	Metric Tons 800 kg/m ³	Metric Tons 721 kg/m ³	Metric Tons 640 kg/m ³	Eave Height (Meters)	Peak Height (Meters)	Maximum Capacity (Cubic Mtrs.)
NCL	30	12	32'-2"	40'-5"	20709	24312	584	526	467	9.80	12.32	688
NCL	30	13	34'-10"	43'-1"	22298	26177	629	567	503	10.62	13.13	741
NCL	30	14	37'-6"	45'-9"	23887	28042	673	607	539	11.43	13.94	794
NCL	30	15	40'-2"	48'-5"	25476	29908	718	647	575	12.24	14.76	847
NCL	30	16	42'-10"	51'-1"	27065	31773	763	688	610	13.06	15.57	900
NCL	30	17	45'-6"	53'-9"	28654	33639	808	728	646	13.87	16.38	953
NCL	30	18	48'-2"	56'-5"	30243	35504	853	768	682	14.68	17.20	1005
NCL	30	19	50'-10"	59'-1"	31832	37370	897	809	718	15.49	18.01	1058
NCL	30	20	53'-6"	61'-9"	33421	39235	942	849	754	16.31	18.82	1111
NCL	30	21	56'-2"	64'-5"	35010	41100	987	889	790	17.12	19.63	1164
NCL	30	22	58'-10"	67'-1"	36599	42966	1032	930	825	17.93	20.45	1217
NCL	30	23	61'-6"	69'-9"	38188	44831	1077	970	861	18.75	21.26	1269
NCL	30	24	64'-2"	72'-5"	39777	46697	1121	1011	897	19.56	22.07	1322
NCL	30	25	66'-10"	75'-1"	41366	48562	1166	1051	933	20.37	22.89	1375
NCL	30	26	69'-6"	77'-9"	42955	50428	1211	1091	969	21.18	23.70	1428
NCL	30	27	72'-2"	80'-5"	44544	52293	1256	1132	1005	22.00	24.51	1481
NCL	30	28	74'-10"	83'-1"	46133	54158	1301	1172	1040	22.81	25.32	1534
NCL	30	29	77'-6"	85'-9"	47722	56024	1345	1212	1076	23.62	26.14	1586
NCL	30	30	80'-2"	88'-5"	49311	57889	1390	1253	1112	24.43	26.95	1639

4. Transporte del grano.

El grano ha de ser transportado desde el campo de labor hasta el silo situado en la propia granja, de aquí normalmente a un depósito local, desde el cual es a su vez distribuido a las industrias transformadoras. Este transporte se realiza mediante contenedores que pueden ser transportados por camiones (10 - 50 t), trenes (100 t) o barcos (transporte fluvial o marítimo).

Dentro de las instalaciones, el transporte del grano de un punto a otro de las mismas se lleva a cabo mediante dispositivos mecánicos o usando el denominado transporte neumático.

Los dispositivos mecánicos más comunes son los siguientes:

- **Cintas transportadoras:** Equipo constituido por una banda que se mueve accionada por dos rodillos situados en sus extremos, y sobre la cual se transportan los sólidos. Tiene la ventaja de su bajo consumo energético y sencillo mantenimiento. Sin embargo, no son aptas en general

para productos pulverulentos, aunque pueden construirse cerradas para reducir la pérdida de material (ver Figura 1.10), ni pueden trabajar con pendientes superiores a 20-25°.



Figura 1.10. Cinta transportadora cerrada, y detalles de los rodillos de los extremos (GSI Grain Systems, 2009).

- **Elevadores de cangilones:** Permiten elevar verticalmente sólidos pulverulentos o troceados (de 1 micra a 10 cm), siendo sus principales ventajas el bajo consumo energético y su bajo coste y simple construcción. Constan de una serie de cubetas, denominadas cangilones, montadas sobre una cadena o banda dispuesta verticalmente y apoyada sobre rodillos o tambores motrices.

En la Figura 1.11 se muestra un elevador de cangilones cerrado, y junto al mismo un detalle de los cangilones (cubetas) utilizadas para el transporte de los granos. Este sistema es muy utilizado para elevar el grano durante el llenado de los silos, que siempre se lleva a cabo por su parte superior. Se muestra también en la misma figura una imagen en la que se puede observar un elevador de cangilones para el llenado de un conjunto de silos.

- **Transportadores de tornillo sin fin:** Están constituidos por una hélice o tornillo montados sobre un eje que se halla suspendido en un canal en forma de “U”. Un motor hace girar el tornillo, que en su movimiento arrastra el sólido que se pretende impulsar. Son de bajo costo y sencilla construcción y permiten además el transporte de materiales pulverulentos en ambientes cerrados. Sus inconvenientes son el alto consumo energético, su rápido desgaste, así como la imposibilidad de superar grandes pendientes manteniendo su eficacia.

En la Figura 1.12 se observa la sección de un transportador de tornillo, y una imagen completa de uno de estos dispositivos, usado para la descarga de silos.

- **Transportadores de cadenas:** Es un tipo de transportador que desplaza el producto en masa, arrastrándolo en flujo continuo dentro de una caja o conducto. La fuerza se comunica a la masa mediante una cadena provista de travesaños de arrastre de diferentes secciones. Son aptas para materiales pulverulentos de pequeño tamaño de partícula y permiten superar pendientes de hasta 60°, aunque para que puedan funcionar correctamente es necesario que el producto presente un cierto grado de adherencia interna. En Figura 1.13 pueden observarse diferentes detalles de un transportador de cadena.

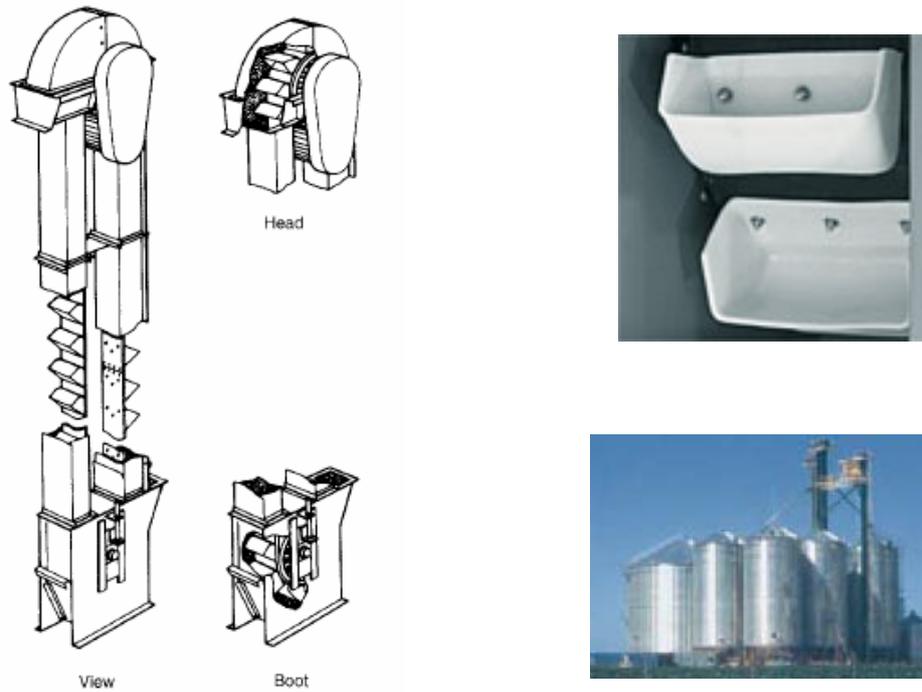


Figura 1.11. Elevador de cangilones, detalle de las cubetas y montaje de los elevadores para el llenado de un conjunto de silos (Coulson, 2002; GSI Grain Systems, 2009).



Figura 1.12. Sección e imagen de un transportador de tornillo sin fin (GSI Grain Systems, 2009).



Figura 1.13. Transportador de cadenas y detalle del sistema de transmisión (GSI Grain Systems, 2009).

A parte de los dispositivos mecánicos descritos el **transporte neumático** es también muy utilizado en la industria de cereales. Esta forma de transporte de sólidos es adecuada para materiales ligeros y pulverulentos de no muy alta granulometría, como es el caso de las harinas. Además está especialmente indicado cuando se pretende mantener limpio el material a transportar. Los sólidos son arrastrados en suspensión en una corriente de aire a través de una conducción cerrada, al final de la cual se sitúa un equipo de separación sólido-gas (un filtro o un ciclón) para separar los sólidos del aire. Este sistema posee una gran capacidad de transporte, que además puede realizarse en todas las direcciones. Sin embargo el consumo de energía es muy elevado comparado con los dispositivos mecánicos de transporte, requiere del uso de equipos de separación gas-sólido y para ciertos productos puede ocasionar la formación de nubes de polvo explosivas, debido a la aparición de cargas provocada por el frotamiento del sólido con las tuberías.

Existen en general dos formas de trabajo en el transporte neumático:

- **En aspiración** (vacío): Se usa un dispositivo de aspiración que succiona el aire a través de la tubería, lo que provoca el arrastre del sólido, alimentado a la misma. Un esquema de una instalación de transporte neumático por aspiración es el de la Figura 1.14:

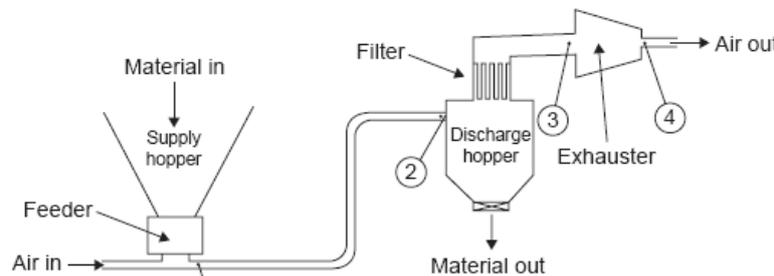


Figura 1.14. Sistema de transporte neumático que funciona en aspiración (Mills, 2004).

- **En impulsión:** Una soplante impulsa al aire al interior de la conducción, arrastrando con él los sólidos, que se alimentan a la misma. El esquema es el de la Figura 1.15:

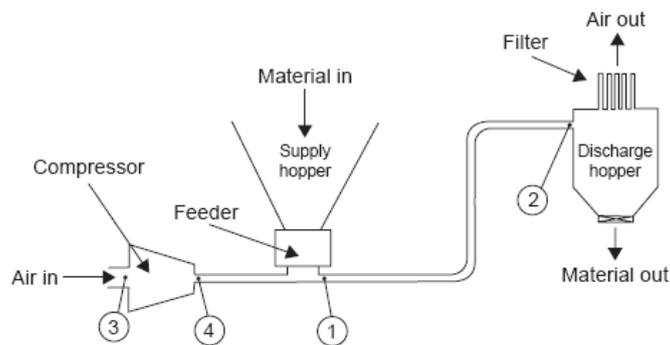


Figura 1.15. Sistema de transporte neumático que funciona en impulsión (Mills, 2004).

Bibliografía:

- Baquero, J. y Llorente, V. Equipos para Industria Química y Alimentaria. Ed. Alhambra, 1985. Contiene información útil para el diseño de equipos de transporte.
- Coulson, J.M. y Richardson, J.F. Chemical Engineering. Vol. 2 (5ª ed.). Butterworth-Heinemann, 2002. Adecuado para operaciones con partículas y también para el tratamiento de datos de distribuciones de tamaño.
- Dendy, D.A.V. y Dobraszczyk, B.J. Cereales y Productos Derivados. Editorial Acribia, 2003
- Mills, D. Pneumatic Conveying Design Guide. Elsevier, 2004.

Páginas web de fabricantes de equipos

- <http://www.world-grain.com>
Página con acceso a estadísticas de producción y comercialización de cereales, así como a una publicación on-line sobre el sector de procesamiento de cereales. Es muy útil para acceder a informaciones y catálogos de casas comerciales a través de la publicidad insertada en la misma.
- <http://www.wintersteiger.com> – Fabricantes de maquinaria agrícola
- <http://www.deere.es> – Fabricantes de maquinaria agrícola
- <http://www.masseyferguson.com> – Fabricantes de maquinaria agrícola
- <http://www.grainsystems.com> – Fabricantes de silos y equipos de procesado de cereal

Tema 2

MOLTURACIÓN DE CEREALES Y SUS PRODUCTOS

Una vez recolectados, secados y tras un periodo de almacenamiento de duración variable, los granos de cereal son transportados hacia las unidades de procesamiento, donde se llevan a cabo en primer lugar los tratamientos preliminares, que aunque pueden variar en función del cereal que se trate, consisten principalmente en la limpieza, acondicionamiento y posterior molienda de los granos.

Mediante la molienda se reduce a polvo los granos de cereal al tiempo que se separan las capas externas del grano del endospermo, obteniéndose diversos productos. Dentro de los procesos de molienda el del trigo es especialmente importante y representativo, ya que la harina de trigo, en sus diferentes variedades es ampliamente utilizada en panificación, repostería y fabricación de pastas alimenticias. Conviene recordar que un grano de trigo contiene un 85% de endospermo feculento, un 3% de germen o embrión y el restante 12% de salvado.

El sector harinero español contaba en 2006 con 178 unidades productoras, que producen alrededor de 3 millones de toneladas de harina por año. Si bien la producción de harina se ha mantenido siempre creciente, el número de empresas del sector ha experimentado una fuerte reducción, especialmente en los años 80 y 90, como se aprecia en la Figura 2.1.

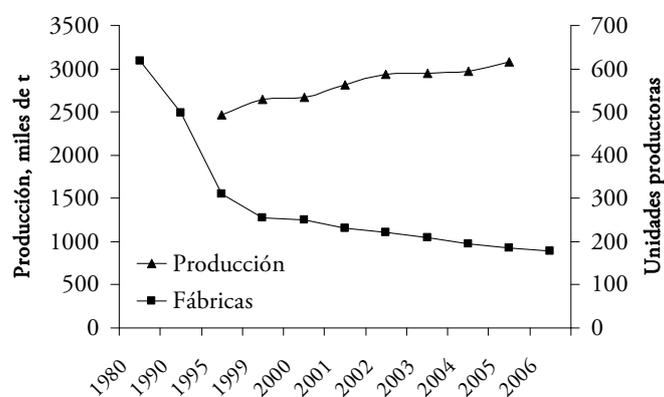


Figura 2.1. Evolución del número de empresas harineras y de la producción de harina en España en el período 1980–2005 (AFHSE, 2009)

A continuación se describirán las diferentes operaciones a las que se someten los cereales, tomando el trigo como ejemplo, desde su llegada a la instalación de procesamiento hasta el envasado de los diferentes productos de la molienda. Estas operaciones son: limpieza, acondicionamiento, molturación y clasificación por tamaño.

1. Limpieza

Los granos que llegan hasta la harinera transportan con ellos elementos extraños tales como pequeñas piedras, tierra, paja o semillas de otros cereales. Por ello es de suma importancia eliminar todos estos contaminantes antes de proceder a la molienda.

Aunque antes de su almacenamiento en la granja se suele llevar a cabo una limpieza preliminar, todas las harineras llevan a cabo una limpieza del cereal bruto recibido como primera etapa de su tratamiento. Esta limpieza es especialmente importante en la fabricación de sémolas, ya que al ser éstas de mayor granulometría que las harinas, las impurezas tenderán a concentrarse en ellas.

Son varios los procedimientos que permiten separar las impurezas, basándose en diferencias de tamaño, forma, densidad o resistencia al aire entre los granos y los agentes extraños, o incluso aprovechando las propiedades magnéticas de las posibles partículas metálicas presentes. En general se emplean los siguientes equipos para la limpieza:

- **Cribas:** Permite separar piedras, tierra o granos de otros cereales basándose en su diferencia de tamaño. Pueden ser grandes planchas horizontales, como la mostrada en la Figura 2.2 o cilindros rotatorios perforados.

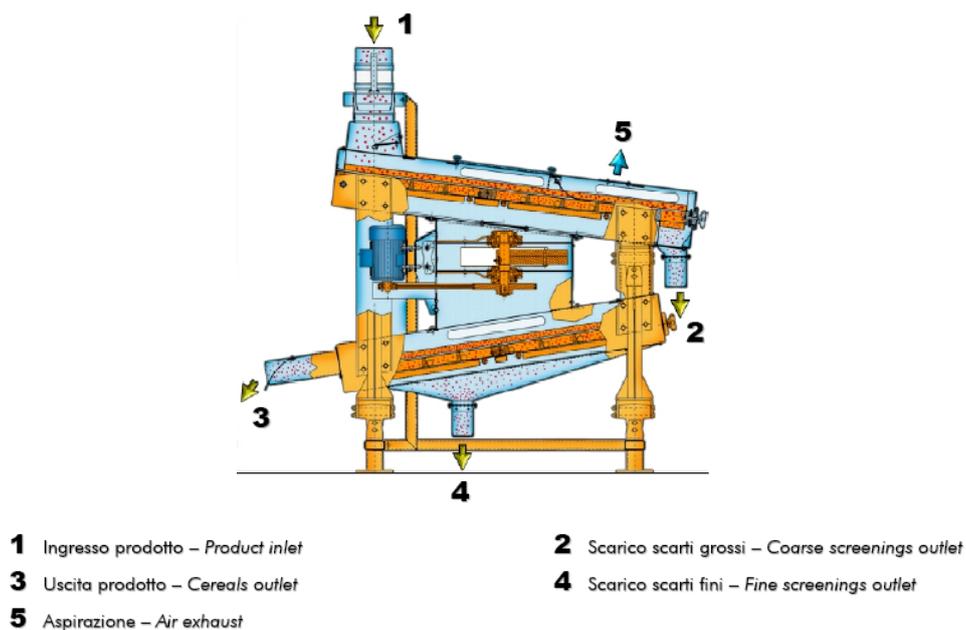


Figura 2.2. Sistema de cribado para limpieza del grano de cereal (Ocrim, 2009).

- **Separadores por peso específico:** Permite separar piedras y fragmentos de vidrio o plástico basándose en su diferente densidad. Así mismo se usan también para separar la fracción de trigo de menor densidad (30% del total). Poseen unos paneles vibrantes que, con ayuda de una corriente de aire, que circula de por aspiración de abajo a arriba, consiguen en primer lugar estratificar el material particulado, para a continuación separarlo en fracciones, en función de su diferente peso específico, tal como se aprecia en la Figura 2.3.

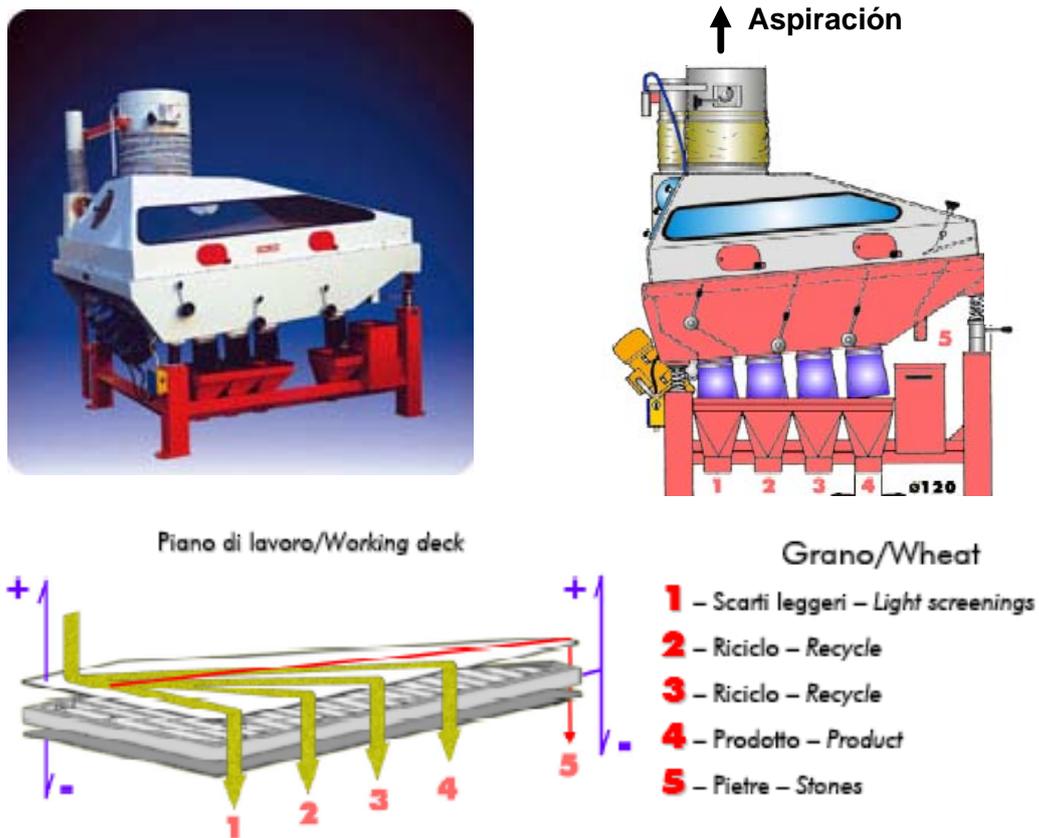


Figura 2.3. Separador por peso específico para cereal (Ocrim, 2009).

- **Separadores mediante corriente de aire (aspiradores):** Aprovechan la mayor facilidad de arrastre de las partículas pequeñas y ligeras en una corriente de aire. Son útiles para la separación de polvo, granos rotos, cáscaras, etc. de los cereales. Una imagen y el correspondiente esquema de este equipo se muestran en la Figura 2.4.

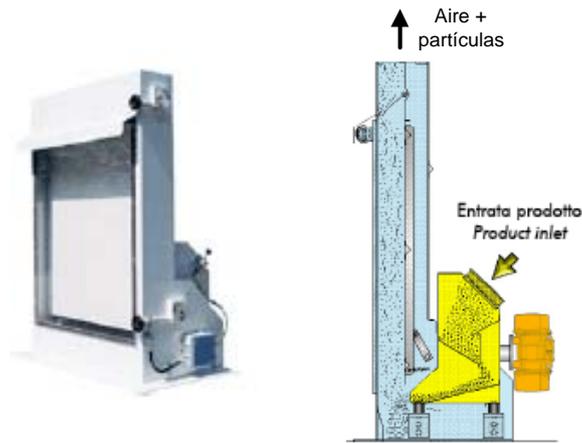


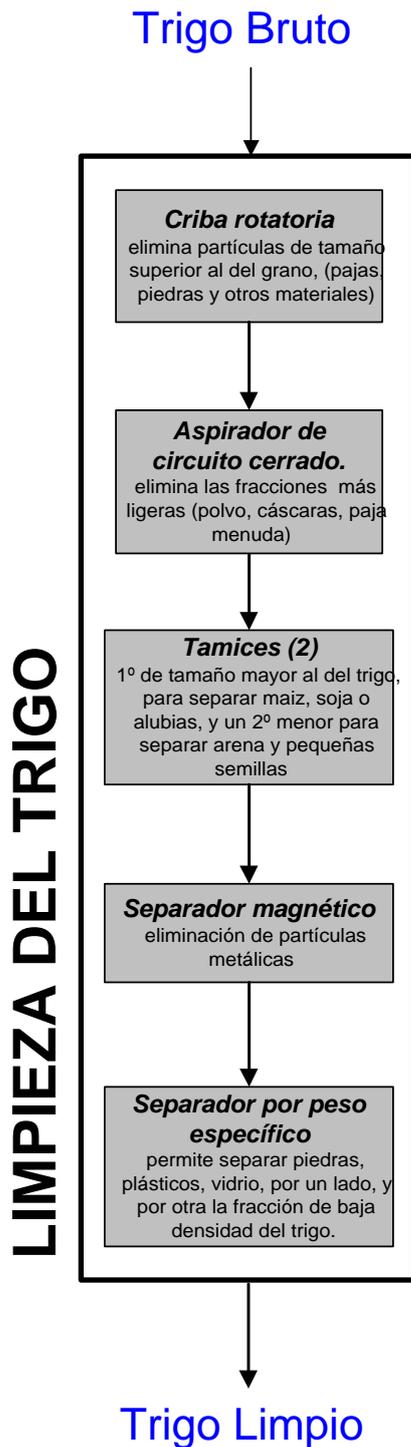
Figura 2.4. Separador de arrastre por aire (Ocrim, 2009).

- **Separadores magnéticos:** Su funcionamiento consiste en establecer un campo magnético alrededor de la conducción por donde circulan los granos de cereal. Al pasar a través del imán, las partículas metálicas quedan adheridas al mismo. Un equipo de estas características se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Separador magnético para la limpieza del cereal (Ocrim, 2009).

En un proceso de limpieza convencional se van intercalando los distintos equipos descritos, como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 2.6.



Entre una y otra operación de limpieza se intercalan obviamente equipos de transporte, así como tanques de reserva y regulación para asegurar un flujo constante.

2. Acondicionamiento del grano

Es una operación previa a la molienda, que consiste en añadir agua al cereal, dejándolo a continuación reposar unas 24 horas, si bien la cantidad de tiempo exacta necesita ser optimizada en función del tipo de cereal. Las razones por las que se acondiciona el trigo son fundamentalmente tres:

- a. Refuerza la fibra, evitando que se rompa en multitud de fragmentos pequeños, muy difíciles de separar, lo que ayuda a producir harina con un bajo contenido en cenizas.
- b. Aumenta la humedad del endospermo, lo que permite obtener una harina con un 14 – 15% de humedad.
- c. Facilita la molienda al emblandecer el endospermo.

El contenido final de humedad en el grano, para alcanzar los anteriores objetivos, es de alrededor del 16.5%.

En la Figura 2.7 se muestra un equipo empleado en el acondicionamiento en continuo de cereales. Consta de un tornillo sin fin, que desplaza los cereales en sentido ascendente, al tiempo que el agua va siendo pulverizada sobre ellos mediante unos inyectores.

Figura 2.6. Proceso de limpieza del trigo, que intercala las diferentes operaciones y equipos descritos en el texto.

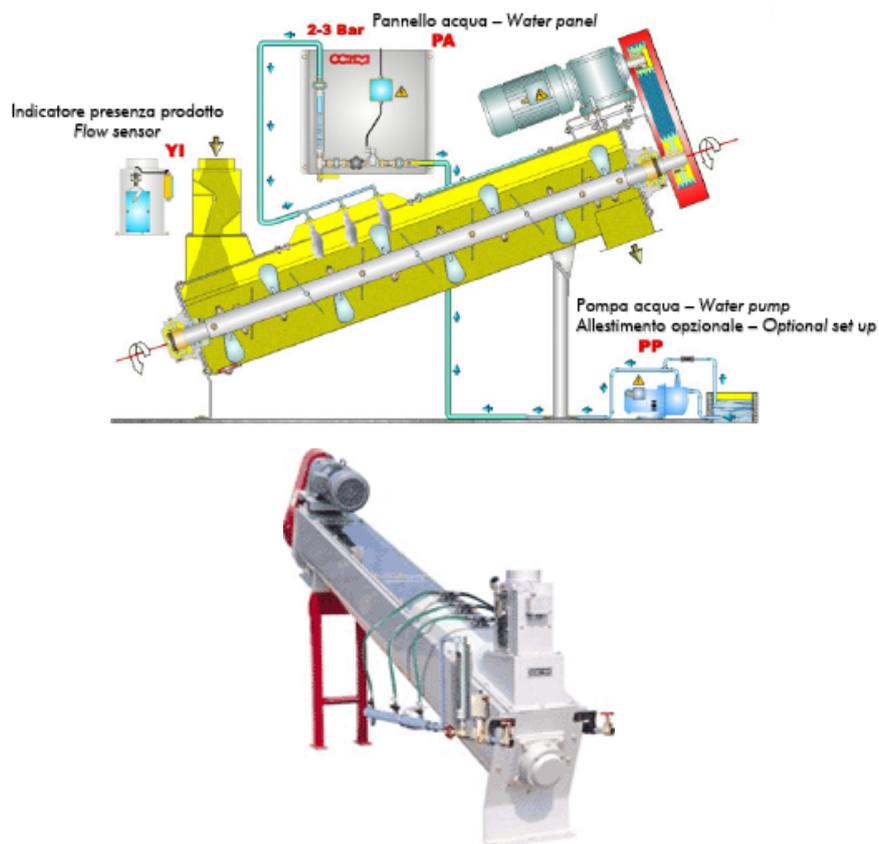


Figura 2.7. Equipo de funcionamiento continuo para el acondicionamiento del cereal (Ocrim, 2009).

3. Molienda

La molienda tiene por objetivo la transformación del endospermo en harina y sémolas, y la separación, lo más íntegras posible de las cubiertas del grano (fibra o salvado) y el germen.

Tabla 2.1. Fracciones de la molienda del trigo

Denominación	Granulometría, μm
Salvado	Partículas más gruesas
Sémolas	1150-430
Semolinas	430-130
Harinas	<130

Se trata de una operación secuencial, en la que se obtienen y se van separando fracciones de diferente granulometría y composición, tales como las que se incluyen en la Tabla 2.1, para el caso del trigo. Por ello el proceso de molienda va intercalando equipos para la molturación (molinos de rodillos), tamices (cernedores o planchisters) y equipos para la clasificación y purificación de las distintas fracciones (sasores y cepilladoras de salvado), tal como se muestra en la Figura 2.8.

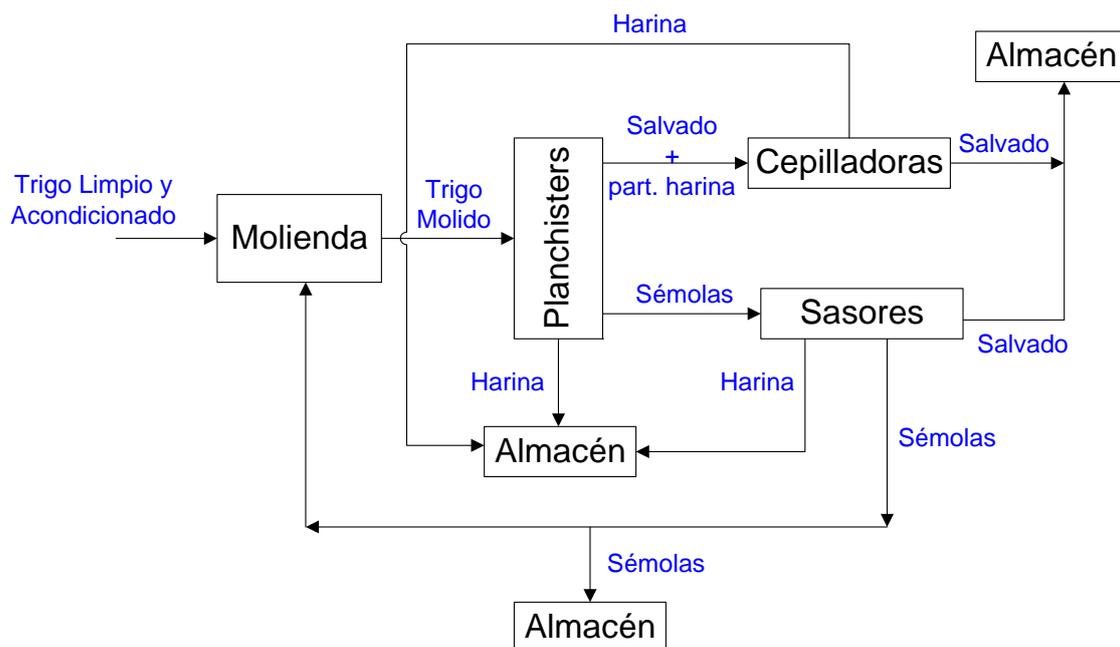


Figura 2.8. Diagrama de bloques simplificado del proceso de molienda del trigo

El anterior diagrama podría dar la impresión de que en una harinera existe un único molino de rodillos y un solo cernedor o planchister, cuando la realidad es que en una harinera de unas 100 t/día de capacidad de molturación se emplean por lo menos 13 molinos de rodillos y otros tantos planchisters para ir separando y clasificando las diferentes fracciones resultantes de la molienda del grano de cereal. Por ello conviene analizar someramente el diagrama de flujo de una harinera real, que se adjunta como un anexo.

Por otro lado, vamos a describir a continuación los principales equipos utilizados en la molturación, clasificación y purificación de las diferentes fracciones obtenidas en la molienda del trigo.

3.1 Molinos de rodillos

En las harineras modernas el molino de rodillos es el equipo utilizado en la práctica totalidad de los casos para la molturación del grano. Esto es así por una serie de razones, entre las que destaca su alta eficacia energética, las posibilidades de ajuste de los parámetros de la molienda, incluso durante su funcionamiento, y porque es capaz de aplastar la envuelta fibrosa del grano, reduciendo a harina el endospermo.

El principio de funcionamiento consiste en someter a los granos a fuerzas de compresión y cizalla, al pasar entre dos rodillos de superficie estriada. Cuando los rodillos son lisos, la fuerza predominante es la de compresión. Tanto el número de estrías de los rodillos como la separación entre ellos influyen en la granulometría del producto final.

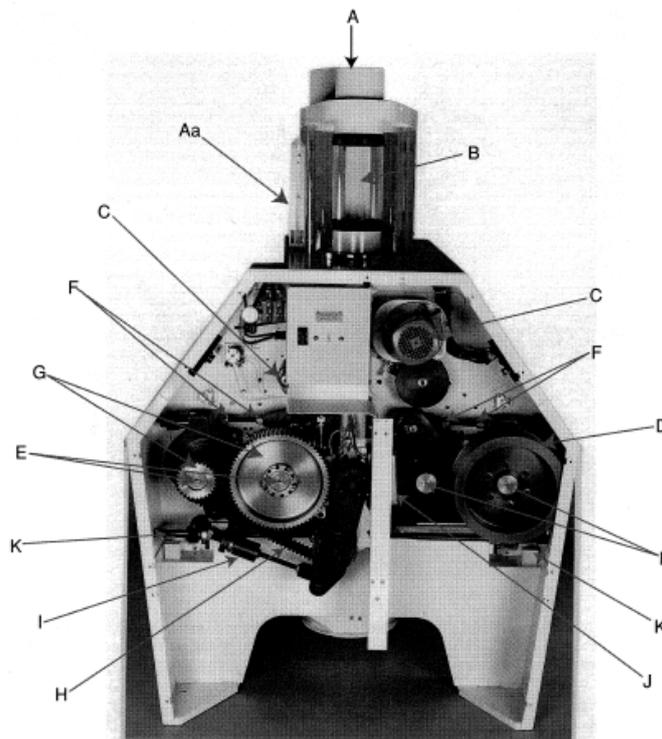
En la Figura 2.9 se aprecia una vista frontal y una sección de un molino de rodillos comercial, así como la imagen de un par de rodillos.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.9. (a) Molino de rodillos comercial (Satake, 2009), (b) pareja de rodillos y (c) sección de un molino de rodillos donde se identifican sus principales componentes (Dendy, 2001).

Cada molino comercial consta habitualmente de dos pares de rodillos, normalmente de 25 cm de diámetro y de un metro de longitud (E en la Figura 2.9.c), que giran a velocidad constante. La alimentación descende por gravedad y entra en el molino por la parte superior (A). Para asegurar una velocidad constante de entrada del grano a los rodillos molturadores, se coloca otro par de

rodillos que giran a velocidad variable (C). El producto de la molturación cae a una tolva, desde donde, mediante transporte neumático (B) es impulsado hacia los planchisters (cernedores).

Las estrías en los rodillos no se encuentran completamente paralelas, sino formando una cierta espiral, para aumentar el efecto cortante. El número de estrías es variable, y aumenta a medida que se progresa en el proceso de molienda, desde las 4.1 – 9.4 estrías/cm, en la zona de ruptura, hasta las 14 en la de reducción, (ver anexo), si bien la mayoría de los rodillos utilizados en el proceso de reducción no tienen estrías, por lo que sólo ejercen fuerzas de compresión.

Por otra parte, para que el efecto de compresión/cizalla sea efectivo es necesario que la velocidad de los rodillos no sea la misma, por ello se trabaja siempre con un rodillo lento y otro rápido, de forma que el primero sostiene el material mientras que el segundo lo moltura por la combinación de efectos de cizalla y compresión.

3.2 Cernedores o Planchisters.

Consisten en un conjunto de cribas colocadas en serie, de forma que permiten clasificar por tamaños el resultado de la molienda. Se construyen con 4, 6, 8 ó 10 secciones de hasta 30 tamices cada una. Las cribas son sometidas a un movimiento vibratorio que permite la separación de las diferentes fracciones por tamaño. Normalmente se colocan tanto en la sección de ruptura como en la de reducción (50:50).

En la Figura 2.10 se muestra un planchister de 10 secciones cerrado y un detalle de una de las secciones abierta.



Figura 2.10. Planchister y sección de tamices (Satake, 2009)

El aspecto normal de una harinera es el que se aprecia en la Figura 2.11, donde muestran los distintos molinos de rodillos y el área donde se ubican los planchisters.



Figura 2.11. Conjunto de molinos de rodillos (izq.) y sección de Planchister de una harinera (der.)

3.3 Purificadores de sémolas o sasores:

Su función es la de separar de las sémolas los fragmentos de cáscara fibrosa que aún permanecen en ellas después de la sección inicial de ruptura. Estos fragmentos no se pueden separar por simple tamizado (en los planchisters) ya que algunos de ellos son del mismo tamaño que las sémolas, por lo que se hace en función de su peso específico, mediante una corriente de aire. El principio implicado es el ya descrito en los separadores por peso específico que se utilizan para la limpieza del grano. Disponen por tanto de uno o dos tamices vibratorios, mientras que el aire es aspirado por la parte superior, por lo que atraviesa la capa de material de abajo a arriba. En la Figura 2.12 se muestra uno de estos equipos.



Figura 2.12. Purificador de sémolas o sasor (Ocrim, 2009)

Los sasores permiten además clasificar las sémolas en función de su tamaño. Por ello son especialmente importantes en las industrias que molturan trigo duro para la fabricación de pastas, ya que en este tipo de instalaciones el producto final son las sémolas, sin que se produzca posteriormente una reducción de su tamaño a harinas.

3.4 Cepilladoras de salvado:

El objetivo de estos equipos es el de separar y recuperar las partículas de harina que permanecen adheridas al salvado, antes de proceder al almacenamiento del mismo. Generalmente funcionan sometiendo al salvado a una fuerza centrífuga en el interior de un tamiz cilíndrico que es accionado por medio de un rotor compuesto de batidores ajustables. De esta forma se consigue desprender la harina y que esta abandone el tambor a través de las paredes, quedando en el interior el salvado limpio. Uno de estos equipos puede verse en la Figura 2.13.

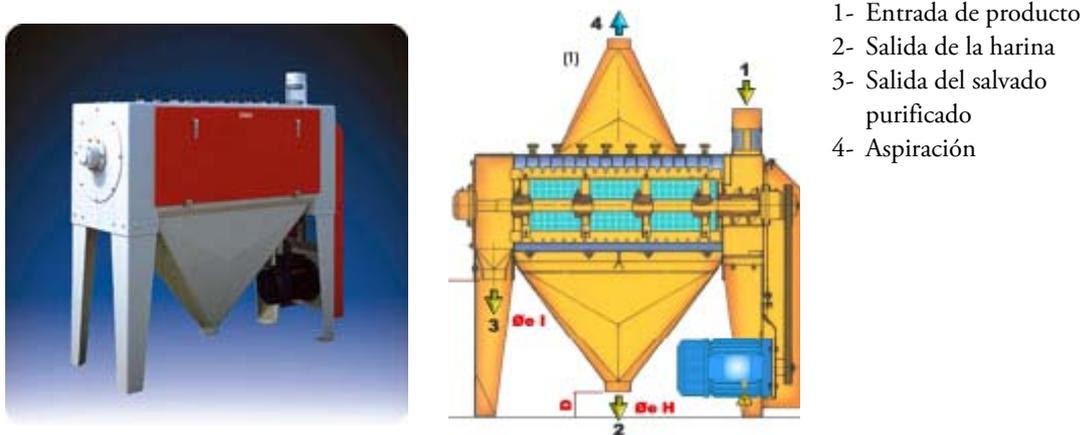


Figura 2.13. Cepilladora de salvado comercial (Ocrim, 2009)

4. Productos de molturación

La molienda del trigo, tal como se ha indicado, genera fundamentalmente tres productos diferentes, en función de la granulometría de los mismos:

1. Salvado, de mayor tamaño, constituido por las capas externas del grano
2. Sémola, que contiene las partículas de endospermo más gruesas (130 a 1000 micras)
3. Harina, formada por las partículas más finas del endospermo.

Sin embargo no todas las sémolas y harinas tienen los mismos usos y propiedades, ya que estos vienen determinados por las características del trigo del cual han sido obtenidas, y fundamentalmente por dos de sus propiedades: la dureza y el contenido y calidad de la fracción proteica del endospermo.

Por ello conviene en primer lugar, antes de describir los distintos tipos de harinas y sémolas que se obtienen en el proceso de molturación, describir las diferentes clasificaciones del trigo y repasar brevemente estas dos importantes propiedades: dureza y contenido proteico.

4.1 Clasificación del trigo

A parte de las diferentes variedades genéticas, el trigo se puede clasificar desde el punto de vista práctico, atendiendo a diferentes criterios:

1. **Época de siembra:** Se distingue entre *trigo de invierno*, que se siembra en otoño/inicio de invierno y se recolecta al inicio del verano, y *trigo de primavera*, que se siembra en invierno y se recolecta al final del verano. Cada variedad se adapta mejor a una determinada climatología, así el trigo de invierno es más adecuado para climas de inviernos no muy duros, ya que los plantones han de sobrevivir al mismo, mientras que el de primavera se adapta mejor a climas de veranos moderados, ya que se recoge al final de los mismos.
2. **Dureza:** Es una de las propiedades fundamentales del trigo, tal como se detallará a continuación. Según este punto de vista el trigo puede ser *duro* o *blando*, o bien del tipo *Durum*, que es la variedad de mayor dureza.
3. **Color:** En función del color de la semilla, que puede ser *pardo-rojizo*, *blanco* o *amarillento*.

4.2 Propiedades del trigo de importancia tecnológica

Desde el punto de vista tecnológico hay dos importantes propiedades del trigo que determinan su comportamiento de cara a la molienda, así como la adecuación de los productos de molturación a sus diferentes usos (panificación, repostería, elaboración de pastas alimenticias, cereales de desayuno, etc.). Estas dos propiedades son la dureza y el contenido y calidad de la proteína.

No entraremos a definir las, porque han sido ya introducidas en otros temas de la asignatura, pero sí indicaremos que las harinas de trigos duros son las más adecuadas para molienda y tamizado, ya que forman partículas angulares, que atraviesan fácilmente los tamices, mientras que las harinas de trigos blandos están formadas por partículas muy pequeñas e irregulares, que pueden bloquear los tamices. El tacto de estas últimas es mucho más suave que el de las primeras. Los trigos de la especie *Durum* se usan sólo para obtener sémolas adecuadas para la elaboración de pastas de alta calidad.

Por otro lado las proteínas del gluten son las responsables de la retención del gas durante la cocción del pan, lo que le confiere su forma y propiedades características (la presencia de fibra

impide el desarrollo de las propiedades del gluten, lo que da lugar a productos más densos cuando se cocina la harina integral).

4.3 *Productos de la molturación del trigo*

Son los siguientes:

a. Harinas:

- *De trigo duro:*

Tienen un contenido en proteína medio-alto (10 a 16%). Las de mayor contenido son útiles en la panificación industrial por su mayor cantidad de gluten, que les confiere mayor elasticidad y resistencia al procesamiento mecánico. Las de menor contenido proteico se venden como harina para uso doméstico (panificación o uso general), ya que son más fáciles de trabajar manualmente.

- *De trigo blando:*

De contenido proteico medio-bajo (7 a 10%), son utilizadas a tanto a nivel industrial como doméstico en la producción de galletas, repostería, crackers, etc.

- *Mezclas:*

Permiten obtener harinas “multiuso” para elaboración doméstica de panes o repostería. Normalmente se busca una calidad del gluten que permita fácil manipulación.

b. Sémolas:

- *De la variedad Durum:*

Tiene un alto contenido en proteína (10-16%). Es utilizada para la elaboración de productos de pasta de alta calidad (macarrones spaghetti, espirales, etc.). En ciertos países es la base de platos tradicionales como el couscous (países árabes o Latinoamérica) o las migas “de harina” (en España). La harina obtenida como subproducto en la molturación del trigo Durum se usa para obtener pastas de peor calidad

- *De trigo duro convencional:*

Usada en la elaboración de cereales de desayuno así como de pastas de baja calidad (fideos, noodles, etc.).

c. Salvado:

Presenta un alto contenido en fibra (9-12%), el mayor de todas las fracciones del trigo. Se utiliza fundamentalmente en alimentación animal, si bien se incorpora también en una gran cantidad de alimentos dietéticos o de alto contenido en fibra.

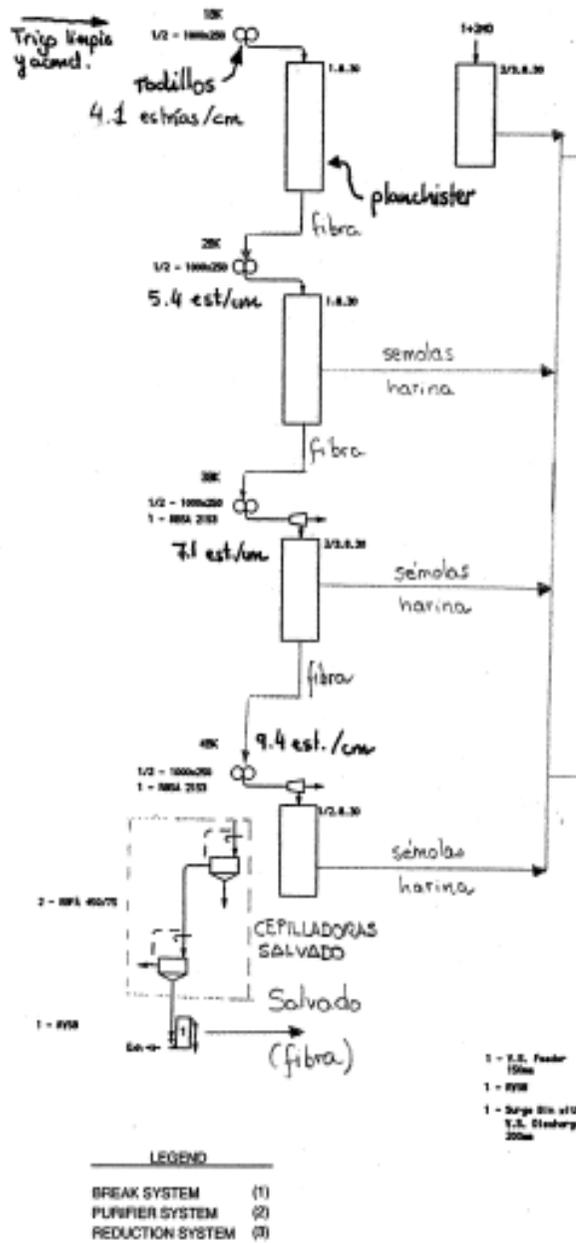
Bibliografía:

- Dendy, D.A.V. y Dobraszczyk, B.J. Cereales y Productos Derivados. Editorial Acribia, 2003
- Pomeranz, Y. Wheat Science And Technology, en Wiley Encyclopedia of Food Science and Technology, F.J. Francis (ed.), John Wiley & Sons, 2000

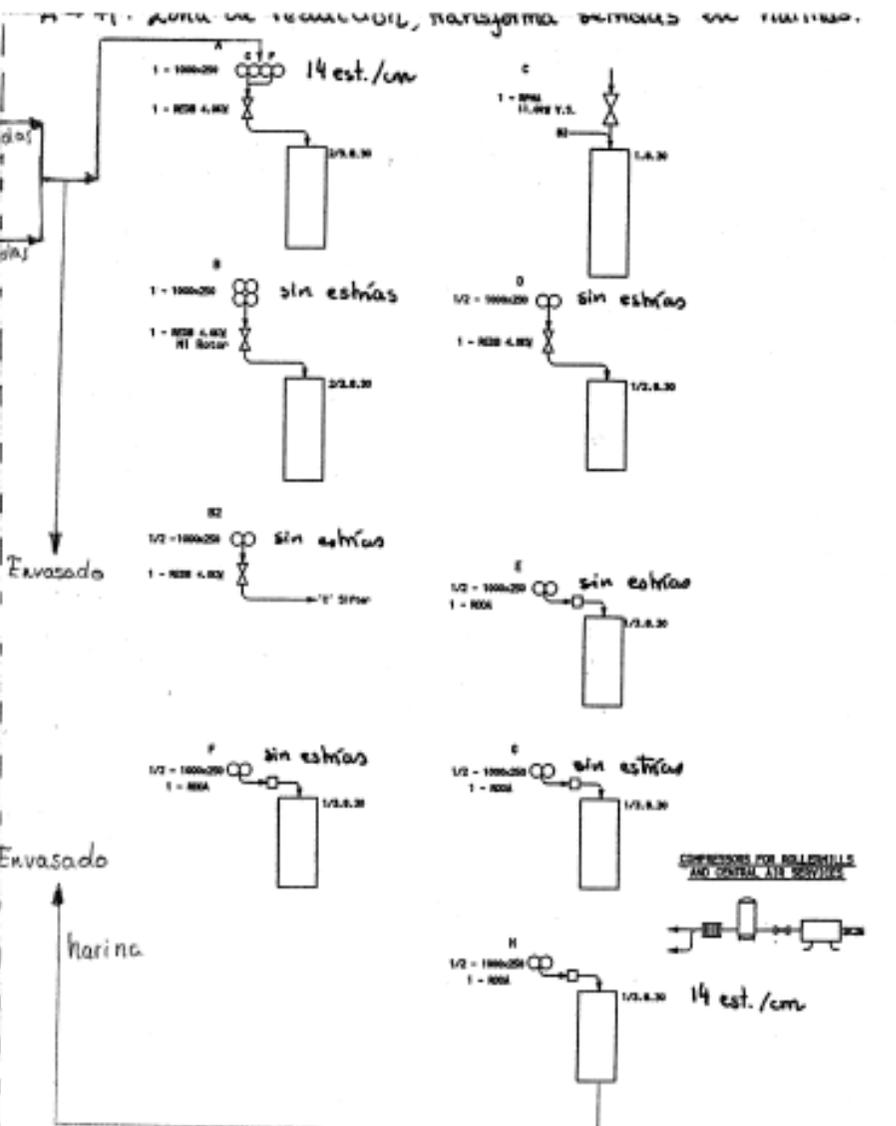
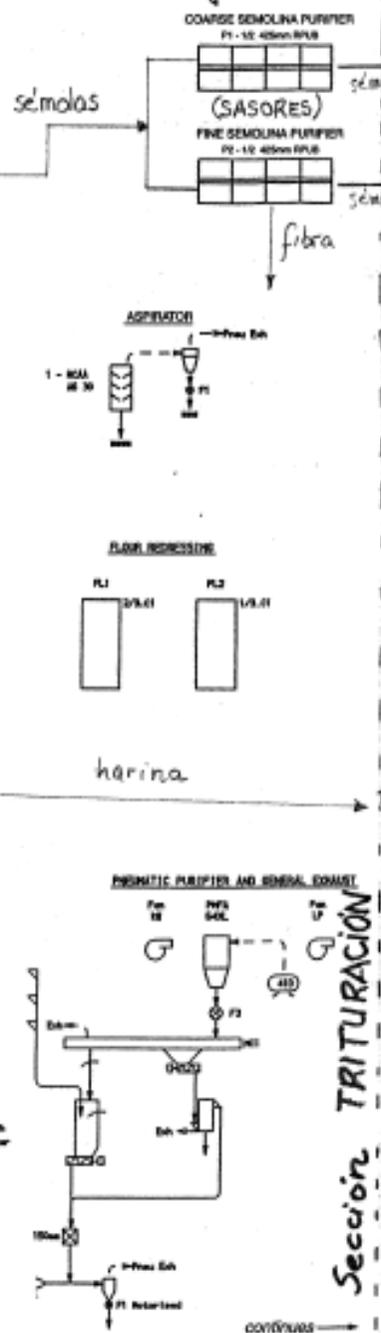
Páginas web de fabricantes de equipos o asociaciones de fabricantes

- <http://www.afhse.com> – Página de la Asociación de Fabricantes de Harinas y Sémolas de España. Tiene datos de producción y otras estadísticas de interés.
- <http://www.ocrim.it> – Fabricantes italianos de maquinaria para molturación de cereal. Las hojas técnicas son bastante explicativas. Hace falta registrarse para tener acceso a los catálogos. Gran variedad de equipos fabricados.
- <http://www.satake.co.uk> – Fabricantes británicos de maquinaria para molturación de cereal. Se trata de una de las más importantes empresas del sector.
- <http://www.prillwitz.com.ar> – Fabricantes de maquinaria para procesado y molturación de cereales. Los catálogos son bastante completos, así como la variedad de los equipos fabricados, y están en español.

1BK a 4BK: Sección donde se produce la ruptura inicial del grano



Nota: las flechas que indican los flujos de materia sólo tienen una finalidad orientativa



MACHINE SPECIMITY & KEY

ROLLER	1000 X 250 Type 800	7
SEPARATOR	8 Section 30 Series Type 800 Separator Type 800	1
REDUCER	Roller 21 Flute Type 800	2
FLAUFER	60mm Type 800	1
In Line Strainers	800 4.80 800 4.00 800 1.00 Y.S.	1
Exhauster	Type 800	1
Bran Flouder	800 400/75	1

NOTES

- ROLL SURFACE = 14,000/1000/2000
- SEPER SURFACE = 0,75"/1000/2000 (Including Rotary Sifters)



Diagrama de flujo de una harinera de 100 t/día de capacidad

Sección REDUCCIÓN

Tema 3

TRANSFORMACIÓN DE ALMIDONES

1. El Almidón: Estructura, Producción y Usos

El almidón es, después de la celulosa, la principal sustancia de tipo glucídico sintetizada por los vegetales superiores a partir de la energía solar y es el constituyente fundamental de los cereales. Constituye, en principio, una fuente de energía para los propios vegetales, que es utilizada por los animales y que ha sido tradicionalmente un alimento básico para la humanidad. Desde el punto de vista estructural, es una mezcla de dos polímeros diferentes de la glucosa, formados ambos por cadenas de α -D-glucopiranosas. Estos dos polímeros son los siguientes:

- **Amilosa:** Es una molécula esencialmente lineal, en la que las unidades de glucosa están unidas entre sí por enlaces α (1,4). Su grado de polimerización (número de unidades de glucosa por molécula) es relativamente bajo, aunque menor en el caso de la amilosa proveniente de los cereales (200 – 1800) que en la procedente de raíces o tubérculos (1000 – 6200). El contenido en amilosa del almidón depende de la fuente de procedencia, variando entre el 18 y el 28%, excepto en alguna especie de maíz, que puede llegar a tener un 85%.
- **Amilopectina:** También está formada por unidades de α -D-glucopiranosas, pero en este caso, aunque las uniones predominantes son del tipo α (1,4), encontramos también enlaces α (1,6), lo que da lugar a ramificaciones en la estructura. Su grado de polimerización es muy superior al de la amilosa (puede ser del orden de varios millones de unidades por molécula), y no depende tanto del origen como en el caso de la amilosa. Aunque varía en función de la especie, la amilopectina viene a constituir en torno al 80% del total del almidón.

En todas las especies vegetales el almidón aparece formando gránulos incluidos en el seno de una matriz proteica.

Desde el punto de vista industrial existen tres materias primas importantes para la obtención de almidón, que son el maíz, el trigo y la patata, siendo el maíz, con diferencia, la principal de todas ellas. El uso del trigo y de la patata es especialmente significativo en Europa e insignificante en

EEUU. Otra fuente de almidón a nivel comercial es la mandioca, usada sobre todo en países de América Central y del Sur.

La disponibilidad de maíz a precios bajos, su facilidad de almacenamiento y su alto contenido en almidón (70%) han hecho de este cereal la principal fuente de almidón a nivel industrial. A continuación describiremos el proceso de obtención del almidón de maíz (ver Figura 3.1). Existen otros procesos similares, pero no iguales, en función de la materia prima utilizada, pero en general en todos ellos se pretende liberar el almidón del resto de constituyentes del vegetal, en el caso del grano de cereal se han de eliminar la fibra, el germen y el gluten.

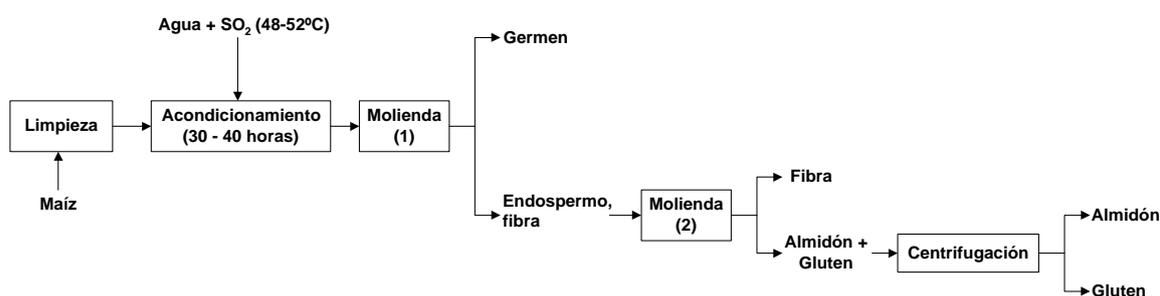


Figura 3.1. Diagrama de bloques del proceso de obtención de almidón de maíz (Daniel y Whistler, 2000).

En la Figura 3.1 se ha representado el proceso de obtención de almidón de maíz, el cual consta de los siguientes pasos: (1) Limpieza de los granos para eliminar partículas extrañas, como se hace antes de la molienda del trigo, usando separaciones por tamizado, magnéticas y por gravedad; (2) Acondicionamiento de los granos, para lo cual se tratan en contracorriente con soluciones acuosas de SO_2 (0.1%) a unos 50°C y durante 30 a 40 horas. De esta forma se consigue reblandecer el grano para mejorar la separación de sus componentes. El SO_2 combate el desarrollo de microorganismos dañinos al tiempo que ataca la matriz proteica facilitando la liberación del almidón.; (3) Molturación de los granos en un molino de frotación (discos). Se trata de una molienda húmeda, en la que se manejan “slurries” (lechadas), es decir, líquidos con alta concentración de sólidos, en vez de sólidos pulverulentos. Consta de un disco móvil (rotor) y uno fijo (estator) entre los cuales se muele el grano debido a los esfuerzos de cizalla (ver Figura 3.2). Su objetivo es la separación del endospermo del germen, lo que se consigue mediante la posterior centrifugación; (4) El endospermo se moltura entre piedras, para liberar los granos de almidón; (5) El “slurry” resultante es tamizado para separar la cáscara y por último centrifugado (6) para separar el gluten con lo que se obtiene el almidón. Este puede someterse a un secado final (7) mediante aire caliente para obtener un producto pulverulento.

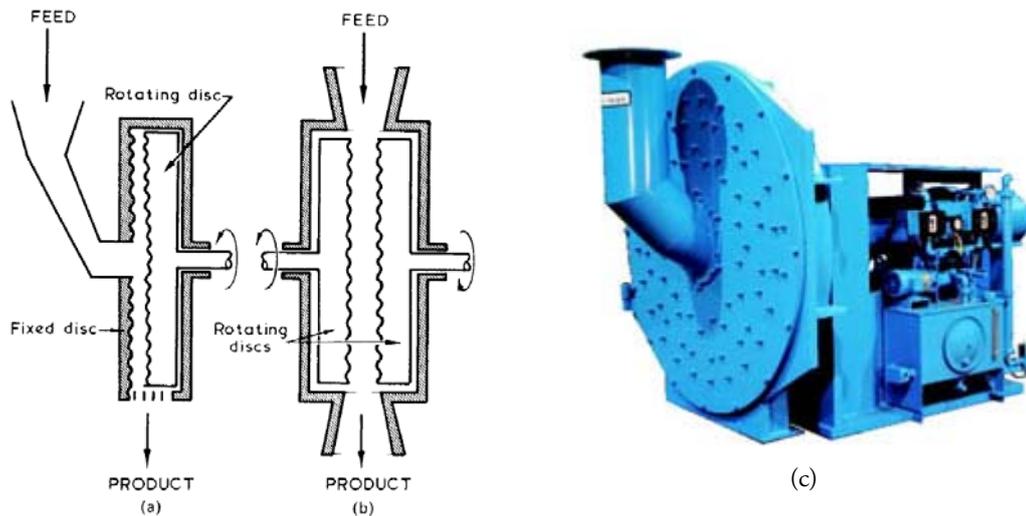


Figura 3.2. Molinos de Frotación de uno (a) y dos (b) discos, del tipo de los usados en la molienda húmeda del maíz (Brennan, 2006); (c) Fotografía de uno de estos molinos

El almidón puede usarse directamente o bien tras someterse a procesos de transformación, o emplearse en la fabricación de jarabes edulcorantes o biocombustibles. El uso depende mucho de la zona geográfica. Así en EEUU el almidón es utilizado para la obtención de bioetanol o bien en la producción de edulcorantes. Por su parte en Europa predomina el uso del almidón nativo o modificado, seguido de la producción de jarabes, siendo despreciable la producción de bioetanol. Vamos a describir en mayor detalle las distintas posibilidades.

- a. Almidón nativo:** El almidón nativo se usa fundamentalmente en la producción de alimentos, tanto a nivel industrial como doméstico, debido a sus propiedades espesantes y gelificantes.

Esta capacidad se basa en la hidratación de los granos de almidón cuando son calentados en presencia de agua, llegando a absorber una gran cantidad de la misma. Al mismo tiempo se produce la disolución de la amilosa de bajo peso molecular. De esta forma un "slurry" de almidón al 1%, que es poco viscoso a temperatura ambiente, incrementa mucho su viscosidad al calentarlo, debido a que casi la totalidad del agua es incorporada en los granos de almidón, lo que incrementa la resistencia al flujo, ya que pasan a ocupar casi todo el volumen.

Por tanto el almidón nativo actúa absorbiendo el agua y proporcionando textura a los alimentos. También puede cocerse y secarse para obtener un producto pre-gelificado soluble en agua fría, que es la base de muchos preparados espesantes usados en la preparación de cremas, flanes, pudines, etc.

Otras industrias como la farmacéutica y la cosmética usan el almidón nativo en sus formulaciones. Incluso en la industria textil y en la del papel, donde se usa como adhesivo, y en petróleo, donde sirve para mantener la viscosidad del fluido usado en perforaciones, se emplea también el almidón

- b. **Almidón modificado:** El almidón puede ser modificado tanto física como químicamente. La modificación física más importante es la pre-gelificación (anteriormente mencionada). Las modificaciones químicas a las que se somete al almidón son: modificación ácida, oxidación, entrecruzamiento, esterificación o eterificación. Aunque no entraremos en ellas, si cabe destacar que su objetivo es en todos los casos el de alterar las propiedades físicas y químicas del almidón, lo que permite multiplicar sus usos tanto en la industria alimentaria como en otras aplicaciones.

2. Jarabes Edulcorantes

Uno de los productos obtenidos a partir del almidón que tiene mayor importancia para la industria alimentaria son los jarabes de glucosa.

2.1 *Definición, desarrollo histórico y usos actuales.*

Los jarabes de glucosa y fructosa, que podemos designar de forma global como jarabes edulcorantes, son el producto de la hidrólisis del almidón, cualquiera que sea su origen, y, en su caso, de la posterior isomerización de la glucosa en fructosa.

Históricamente los jarabes edulcorantes se desarrollaron como una alternativa a la sacarosa (disacárido constituido por glucosa y fructosa) que es el principal edulcorante históricamente usado por el hombre. Además de su elevado poder edulcorante (mayor que el de la glucosa) la sacarosa contribuye al desarrollo de aromas y colores característicos en los alimentos, determina la textura y palatabilidad de los productos y es importante desde el punto de vista nutricional. Las materias primas utilizadas en la producción de sacarosa son fundamentalmente la caña de azúcar (inicialmente, y aún en la actualidad en los países tropicales) y la remolacha. Sin embargo, algunos factores propiciaron la búsqueda de edulcorantes alternativos:

- a. En el siglo XIX, debido fundamentalmente a las guerras napoleónicas se interrumpió el suministro de azúcar de caña procedente de América, con lo que se empezaron a buscar sustitutos a la sacarosa.
- b. Necesidad de edulcorantes con propiedades diferentes, por ejemplo, un menor poder edulcorante, lo que permitía apreciar mejor el aroma de ciertos productos como los caramelos.

c. Requerimiento de glucosa de elevada pureza.

Todos estos factores impulsaron el desarrollo de procesos industriales para obtener jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis del almidón, siendo el más antiguo de todos ellos el iniciado por Kirchoff en 1811, que posteriormente se fue perfeccionando.

Los jarabes de glucosa presentan numerosas ventajas de cara a su procesado industrial, tal como su adecuada viscosidad y su elevada solubilidad, sin embargo, tal y como se aprecia en la Tabla 3.1, su poder edulcorante es siempre inferior, sea cual sea su grado de hidrólisis, al de la sacarosa. Esto trajo consigo la necesidad de obtener productos de capacidad edulcorante igual o incluso mayor que la de la sacarosa, sobre todo para su uso en las bebidas refrescantes, lo cual se consiguió mediante el desarrollo de los jarabes de glucosa-fructosa (HFCS).

Tabla 3.1. Poder edulcorante relativo de diversos edulcorantes naturales y artificiales.

Edulcorante	Poder edulcorante relativo*
Sacarosa	1.0
Glucosa	0.7
Fructosa	1.3
Maltosa	0.3
Jarabe Glucosa 11 DE	<0.1
Jarabe Glucosa 42 DE	0.3
Jarabe Glucosa 97 DE	0.7
HFCS (42% fructosa)	1.0
HFCS (55% fructosa)	1.1
Aspartame	180
* por unidad de masa, en base seca	

En la actualidad los jarabes de glucosa se usan fundamentalmente en la producción de caramelos, y en menor medida en la de bebidas refrescantes, mientras que los jarabes de glucosa-fructosa tienen aplicación casi exclusiva en la industria de bebidas refrescantes.

2.2 Producción de los jarabes edulcorantes.

El proceso de producción de jarabes de glucosa consiste fundamentalmente en la hidrólisis del almidón, para dar glucosa y dextrinas, y en el caso de los jarabes de glucosa-fructosa el proceso continua con la isomerización de la glucosa a fructosa, y su posterior purificación por cromatografía, tal y como se indica en el esquema general mostrado en la Figura 3.3.

En la Figura 3.4 se muestran las estructuras de las diferentes moléculas implicadas en este proceso: dextrinas, glucosa y fructosa.

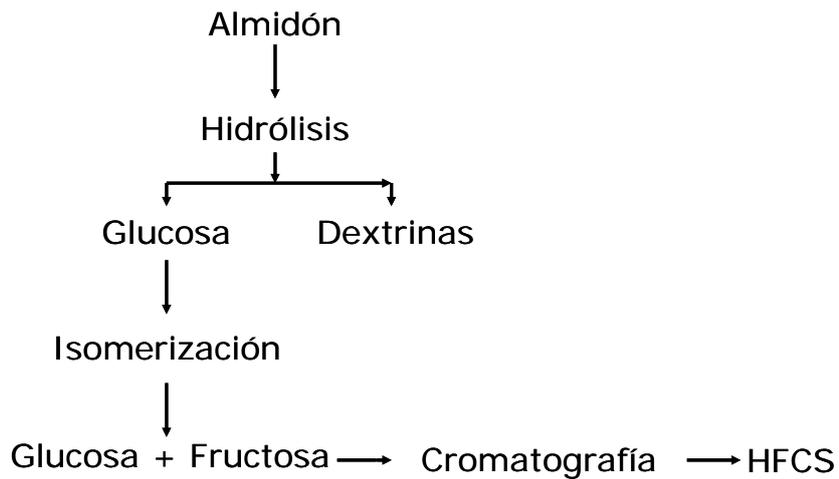


Figura 3.3. Esquema general del proceso de obtención de jarabes edulcorantes

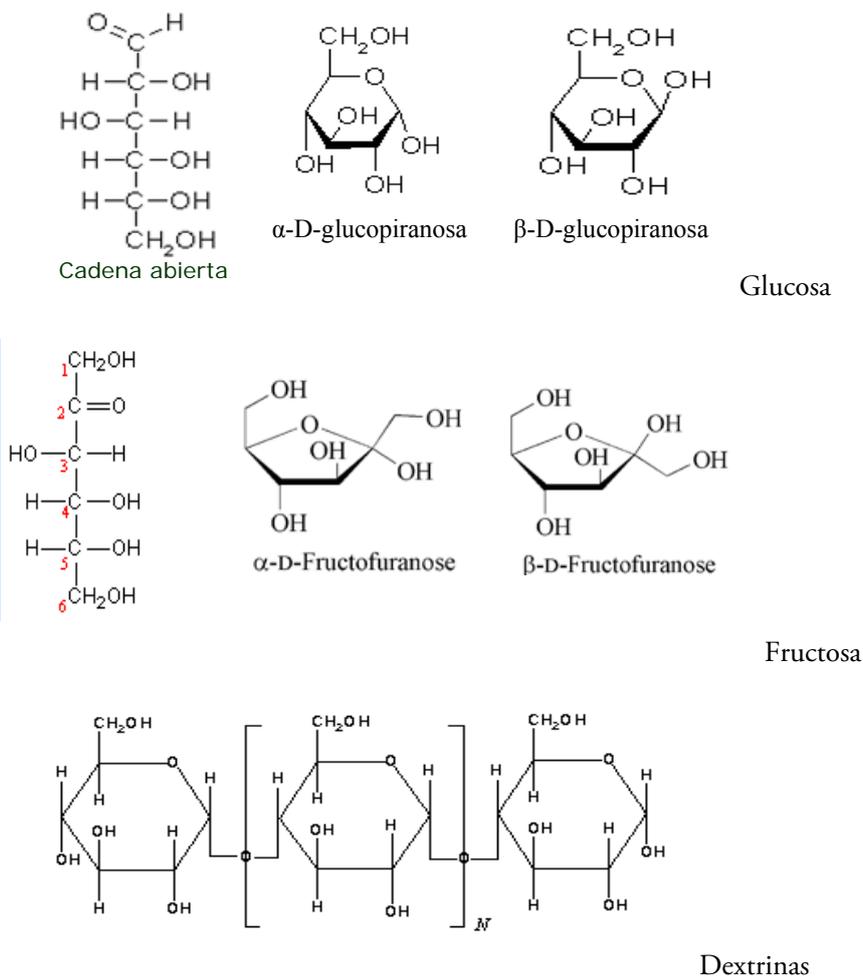


Figura 3.4. Fórmula y estructura molecular de los diferentes productos implicados en la hidrólisis del almidón y producción de jarabes edulcorantes.

2.2.1. Jarabes de glucosa

A veces es necesario pretratar el almidón, mediante su molienda o bien aplicando un tratamiento térmico intenso, pero lo característico a todos los procesos es que parten de una lechada o pasta (“slurry”) del almidón en agua.

La hidrólisis consiste en la ruptura de un enlace glicosídico (ya sea 1→4 o 1→6), con la incorporación de una molécula de agua. El progreso de la hidrólisis se mide contabilizando el número de enlaces glicosídicos rotos, respecto del total posible, y se suele expresar mediante los equivalentes en dextrosa (DE, de sus siglas en inglés), cuya definición es:

$$DE = \frac{\text{número de enlaces rotos}}{\text{número total de enlaces glicosídicos presentes}}$$

El problema de la anterior definición es que no resulta fácil contabilizar el número de enlaces rotos, por lo que en la práctica se usa la siguiente definición que es equivalente:

$$DE = \left(\frac{\text{Contenido en azúcares reductores (expresado en gramos de glucosa)}}{\text{Masa total de almidón (gr)}} \right) \times 100$$

Los azúcares reductores son aquellos que presentan un –OH libre en el carbono anomérico, y que por lo tanto pueden reducir al cobre (II) del reactivo de Benedict o del de Fehling. El almidón tiene un poder reductor casi nulo (DE = 0), ya que el –OH del carbono anomérico de las unidades de glucosa forma parte de los enlaces glicosídicos (no está libre), pero a medida que va progresando la hidrólisis y se rompen los enlaces, aumenta la cantidad de azúcares reductores presente, hasta que llegaría a ser la equivalente a la de todas las unidades de glucosa del almidón, pero libres (DE = 100), lo que ocurriría cuando la hidrólisis hubiera alcanzado su máxima extensión.

Existen tres formas (propriadamente dos) de llevar a cabo la hidrólisis:

- **Hidrólisis ácida:** Se usa un ácido como catalizador de la hidrólisis. Es muy inespecífica, ya que puede afectar a cualquier enlace glicosídico (independientemente de su posición o su tipo). Se parte de un “slurry” de un 30 – 40% de almidón y se acidifica hasta pH 2. Normalmente se trabaja a temperaturas elevadas (hasta 160°C) y altas presiones (4.4 a 6.1 atm.) para acelerar el proceso, lo cual puede dar lugar a reacciones secundarias. Además es necesario neutralizar el producto final, lo que se hace con carbonato sódico, formándose sales insolubles, que han de ser eliminadas. Permite obtener jarabes de 40 – 45 DE, ya que por debajo de 30 existen problemas de retrogradación (repolimerización) y por encima de 55 aparecen productos indeseables debido a las reacciones secundarias. Aunque el resultado final del proceso es muy reproducible, presenta

el inconveniente de que no permite controlar la distribución del grado de polimerización de los productos obtenidos.

- **Hidrólisis enzimática:** Presenta numerosas ventajas sobre la hidrólisis ácida, por lo que se suele emplear en la mayoría de los procesos. Al igual que en la hidrólisis ácida se parte de un slurry de 30-40% en peso de almidón. En este caso se trabaja a un pH ligeramente ácido (6.0 – 6.5), temperaturas 95 – 110°C y presión atmosférica. Consta de dos etapas: (1) licuefacción y (2) sacarificación.

En la *licuefacción* se rompe la estructura del almidón, para permitir un mejor acceso de las enzimas al interior del mismo, al tiempo que se lleva a cabo una pre-hidrólisis del mismo hasta 10 – 15 DE. Para realizarla se añaden α -amilasas termoestables al almidón (ver Tabla 3.2) y se calienta a 103 – 107°C por inyección de vapor manteniéndolo unos 10 min. a dicha temperatura. Después se mantiene a 95°C durante 1 – 2 horas, para permitir la actuación de las enzimas.

La *sacarificación* consiste en la hidrólisis de los productos obtenidos en la licuefacción. Se usan otras enzimas, fundamentalmente glucoamilasas, y permite llegar a valores de hasta 97 DE, aunque para esto requiere unas 72 horas. Se trabaja a pH y temperaturas moderadas (60 – 70°C). En la actualidad el proceso se suele llevar a cabo en continuo y con enzimas inmovilizadas.

En la Tabla 3.2 se incluyen las enzimas más comúnmente usadas en la hidrólisis enzimática del almidón.

- **Hidrólisis ácida-enzimática:** Cuando no se disponía de enzimas termorresistentes, la primera etapa de la hidrólisis enzimática se llevaba a cabo mediante un tratamiento térmico en medio ácido, con la misma finalidad anteriormente explicada. Después se continuaba con la sacarificación, igual que la hidrólisis enzimática.

Tabla 3.2. Principales enzimas utilizadas en la hidrólisis del almidón.

Enzima	Acción
α -amilasa	Actúan aleatoriamente sobre enlaces $\alpha(1,4)$ para dar a-dextrinas así como maltosa (DP = 2) y oligosacáridos con DP = 3, 4, 5, 6 y 7.
β -amilasa	Actúa sobre enlaces $\alpha(1,4)$ en los extremos no reductores, rindiendo dextrinas y β -maltosa
glucoamilasa	Actúa sobre enlaces $\alpha(1,4)$ y $\alpha(1,6)$ en los extremos no reductores para dar β -glucosa.

A continuación se resumen las principales ventajas de la hidrólisis enzimática respecto de la ácida:

- a. Selectividad: No existen procesos de degradación del sustrato ya que las enzimas son selectivas para un tipo de enlace. Así se evita la aparición en el medio de productos indeseados.
- b. Operación a pH, presiones y temperaturas moderadas: A diferencia de la hidrólisis ácida el pH está comprendido entre 5 y 8 y las temperaturas entre 40°C y 100°C. Se reduce también de esta forma la aparición de productos de degradación indeseados en el medio, al tiempo que se ahorra energía.
- c. No requiere la adición de sustancias extrañas al medio: Después de la hidrólisis ácida es necesario neutralizar y por tanto se eleva apreciablemente el contenido en sales, que han de ser eliminadas del medio (lo cual es fácil siempre que sean insolubles).
- d. Separación o desnaturalización de la enzima: Las enzimas se usan en dosis bajas, no son tóxicas y pueden separarse por desnaturalización térmica o mediante adsorción en carbón activo o ultrafiltración. Otra posibilidad es el uso de enzimas inmovilizadas.

2.2.2. Jarabes de glucosa-fructosa

Los jarabes de glucosa-fructosa tienen mayor poder edulcorante que los de glucosa, razón por la cual son producidos. Se parte del producto de hidrólisis del almidón, es decir, de jarabes de glucosa, con un extracto seco del 40 – 50% (esto requiere concentración previa) y un contenido de glucosa de 95-96% en base seca.

Se produce casi exclusivamente por vía enzimática, mediante la enzima glucosa isomerasa (que requiere de Mg^{2+} como cofactor). La producción se lleva a cabo en reactores tipo columna de relleno, que contienen la enzima inmovilizada. Se trabaja normalmente a 55–65°C y a pH ligeramente alcalino (7.5 – 8.5) hasta una conversión del 42% como mínimo. A medida que pasa el tiempo la enzima se va desactivando, con lo que es necesario aumentar el tiempo de retención (disminuir el caudal), para mantener constante la conversión.

Sin embargo, por medio de la isomerización no es posible alcanzar una conversión de glucosa en fructosa superior a aproximadamente el 50%, debido al equilibrio termodinámico de la reacción. Por ello, para incrementar el contenido final en fructosa se recurre a técnicas cromatográficas, que permiten incrementar el contenido en fructosa hasta un 80-95%. Este producto es mezclado con el jarabe inicial, obtenido por isomerización, para alcanzar un contenido final de fructosa del 55%, jarabe que posee las características requeridas para ser usado como edulcorante en bebidas refrescantes.

Bibliografia:

- Daniel, J.R., Whistler, R.L., Starch, en Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000
- Brennan, J.G. Mixing, Emulsification and Size Reduction, en Food Processing Handbook, J.G. Brennan (Ed.), WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006
- Schenck, F.W., Glucose and Glucose-Containing Syrups, en Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000

Tema 4

CEREALES DE DESAYUNO Y APERITIVOS

1. La extrusión en la industria de alimentos

Dado que la extrusión es la operación más utilizada en la actualidad para la producción de cereales de desayuno y aperitivos a base de cereal, comenzaremos este tema describiendo, a modo de revisión, las principales características de esta operación que tiene una amplia implantación en la industria alimentaria en general.

1.1. *Definición y orígenes de la extrusión.*

En general la extrusión se puede definir como el proceso de bombeo de una sustancia plástica, bajo diferentes condiciones, a través de una restricción o troquel para obtener diferentes tipos de productos. En sus orígenes la extrusión se aplicó para obtener tuberías de plomo sin soldaduras, en el año 1797. Su primera aplicación en la industria alimentaria fue la producción de embutidos, a mediados del siglo XIX, pasando a aplicarse a partir de 1930 en la fabricación de pasta (macarrones). En todos estos ejemplos la extrusión consistía únicamente en mezclar los ingredientes y moldearlos al pasar a través de una boquilla troquelada. Sin embargo, los extrusores actuales son equipos mucho más complejos que no sólo mezclan y moldean, sino que transforman las materias primas (harina, almidón, etc.) en productos intermedios o incluso terminados, aptos para su consumo directo. Por ello la extrusión hoy día se utiliza en la industria alimentaria para la producción de pasta, cereales de desayuno, galletas, alimentos infantiles, aperitivos, golosinas, chicle, proteína vegetal texturizada, almidones modificados, comida para mascotas y sopas deshidratadas, entre otros productos.

1.2. *Tipos básicos de extrusores y sus aplicaciones*

Existen básicamente tres tipos de extrusores en función de su configuración, que cumplen aproximadamente con la definición anterior. Estos tres tipos son:

- a) **Extrusores de rodillos** (Figura 4.1.(a)): La masa, previamente formada, es forzada a pasar entre dos rodillos que giran en sentidos opuestos y que pueden ser lisos o tener troqueles en ellos. En el primer caso sólo formarán una lámina del grosor que se desee (según la

separación entre los rodillos), y en el segundo permitirán también cortar las formas deseadas en dicha lámina. Un ejemplo del uso de este tipo de extrusores en la industria de cereales es la producción de aperitivos como los del tipo nachos o Doritos® o las tiras de maíz (Fritos®). La única misión del extrusor es la de dar forma a los productos. La preparación del alimento se debe terminar en otro equipo diferente, horneándolo o friéndolo.

- b) **Extrusores de pistón** (Figura 4.1.(b)): En este caso la masa, también previamente formada, se bombea por medio de un pistón o un conjunto de pistones, a través de una boquilla. Dicha boquilla se puede diseñar para dar al producto la forma deseada, con lo que una cuchilla irá cortando porciones iguales, que normalmente caen sobre una cinta transportadora que las lleva a un horno. De esta forma se pueden producir galletas o similares. Es también posible diseñar el extrusor de forma que los pistones simplemente dosifiquen la cantidad necesaria de masa sobre una forma o molde, que es el que le da al producto la apariencia final. Es el caso de las magdalenas o productos similares.

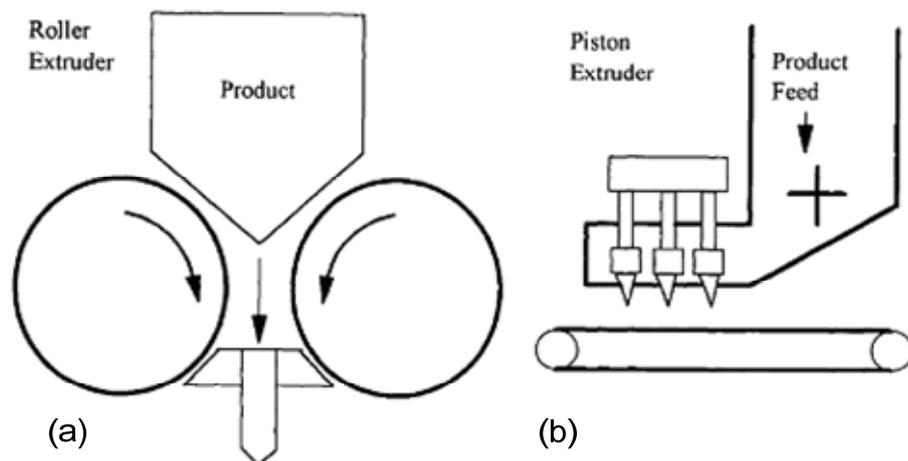


Figura 4.1. Extrusores de rodillo (a) o pistones (b) (Gray y Chinnaswamy, 1995).

- c) **Extrusores de tornillo:** Consisten en uno o varios tornillos que giran en el interior de una cámara cilíndrica. El movimiento de los tornillos transporta el material y lo fuerza a través de un troquel, que puede adoptar formas variadas. Es posible controlar diversos parámetros del proceso, tal como la velocidad y configuración de los tornillos, la temperatura y longitud de la cámara o la forma del troquel. Este tipo de extrusor no sólo mezcla y moldea, como los dos anteriores, sino que es capaz de “cocinar” los distintos ingredientes dando lugar a productos semi-acabados o completamente acabados. Aunque ya en 1800 se utilizaron para la fabricación de embutidos, e incluso una máquina de picar carne es realmente un extrusor de este tipo, los extrusores de tornillo han alcanzado un gran

desarrollo en las últimas décadas, por el control que permiten del proceso de extrusión y su enorme versatilidad, que hace posible usarlos en la fabricación de productos variados e innovadores. Una clasificación de los extrusores de tornillo, así como una descripción de su funcionamiento y aplicaciones la haremos en el apartado siguiente.

1.3. Clasificación, funcionamiento y aplicaciones de los extrusores de tornillo

Los extrusores de tornillo pueden ser de tornillo simple o doble, e incluso múltiples, pero esto último no es lo más frecuente.

1.3.1. Extrusores de tornillo simple

Son los más extendidos en la práctica, ya que es fácil de operar y requiere menos entrenamiento de los operarios. Además tienen un coste y mantenimiento más bajo que los extrusores de tornillo doble. En la industria se utilizan básicamente 5 tipos de extrusores de tornillo simple, que se recogen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Principales tipos de extrusores de tornillo simple, características y usos (Gray y Chinnaswamy, 1995).

	Pasta Press	High-Pressure Forming Extruder	Low-Shear Cooking Extruder	Collet Extruder	High-Shear Cooking Extruder
Feed moisture, %	32	25	28	11	15-20
Product moisture, %	30	25	25	2	4-10
Maximum product temperature, °C	52	80	150	200	180
Screw diameter to flight height, D/H	3-4	4.5	7-15	9	7
No. of parallel screw flights,	1-2	1	1	2-4	1-3
Screw speed, s ⁻¹	4.5	6.5	10-30	50	70
Shear rate in screw, s ⁻¹	5	10	20-100	140	165
Net mechanical energy input, MJ/kg	0.11	0.14	0.14	0.36	0.40
Steam injection, MJ/kg	0	0	0.11	0	0
Heat transfer through jackets, MJ/kg	(0.04)	(0.04)	0-0.11	0	(0.11)-0
Net energy input to product, MJ/kg	0.07	0.10	0.25-0.36	0.36	0.29-0.49
Product types	Pasta	RTE* pellets. second-generation snacks.	Soft moist products, starch, soup bases, RTE* snacks.	Puffed snacks	TVP#, Dry pet foods. Modified starch.

* Ready to Eat Cereals

Texturized Vegetable Protein

Los diferentes extrusores comerciales de tornillo simple se diferencian unos de otros en ciertos aspectos de su diseño, que les permite conseguir diferentes tipos de producto. Estos aspectos son fundamentalmente:

- La *temperatura* a la que trabajan, la cual se establece controlando el intercambio de calor con el exterior. La fuente de calor puede ser vapor externo o la propia disipación viscosa de la energía mecánica en el interior. A veces es necesario incluso enfriar para evitar que dicha disipación genere elevadas temperaturas en el extrusor.
- La magnitud de los *esfuerzos de cizalla* que producen: la configuración del tornillo, y la relación entre el diámetro del mismo y la profundidad de las vueltas, permite controlar este aspecto.
- La *longitud de la cámara* de extrusión.

Además, según la humedad del material de partida, es posible generar diferentes tipos de productos finales, más o menos expandidos.

El primer paso en cualquier proceso de extrusión consiste en mezclar cuidadosamente en seco todos los ingredientes sólidos (por ejemplo harinas), para posteriormente añadirles agua y otros componentes líquidos de modo que alcancen el grado de humedad deseado. Esta operación, conocida como precondicionamiento, se lleva a cabo en un equipo independiente del extrusor, pero colocado justo antes de este, tal y como se aprecia en el Figura 4.2.

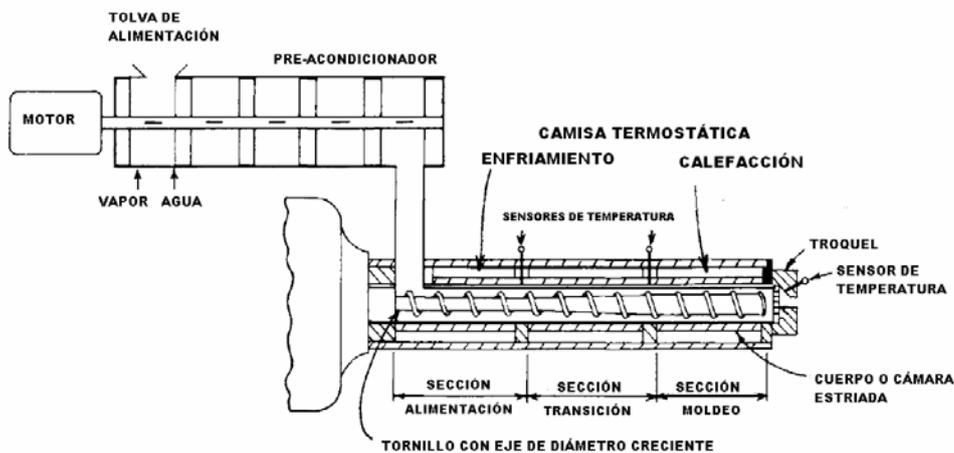


Figura 4.2. Secciones de un extrusor convencional de tornillo simple. Se muestra también el preacondicionador (adaptado de Gray y Chinnaswamy, 1995).

La cámara del extrusor consta de tres secciones diferentes, en las que la masa que está siendo extrudida pasa por distintas transformaciones, hasta que acaba saliendo por el troquel o boquilla final.

- a. *Sección de Alimentación:* Recibe directamente los ingredientes desde el preconditionador, los comprime y trabaja, mientras los transporta hasta la sección de transición. El paso del tornillo es más amplio y la profundidad de las vueltas mayor, para permitir la entrada de las materias primas y facilitar el transporte.
- b. *Sección de Transición:* En ella los ingredientes se amasan, calientan y cuecen, lo que se consigue al ir modificando la geometría del tornillo, disminuyendo la altura de las vueltas, con lo que aumentan las fuerzas de fricción y cizalla, aunque también puede lograrse mediante calentamiento externo. Se trata de un proceso HT/ST, ya que se alcanzan altas temperaturas (hasta 200°C) en poco tiempo (60 s máx.).
- c. *Sección de Moldeo:* La función de esta zona es la de recibir el material a alta presión, homogeneizarlo y bombearlo a través del troquel a presión constante. En esta región, la temperatura y la presión aumenta muy rápidamente (puede llegar a las 170 atm.) debido a la escasa profundidad de las vueltas del tornillo, así como al pequeño tamaño del troquel. A la salida del troquel el producto se expande como consecuencia de la evaporación de la humedad al pasar a una región de presión más baja. Es entonces cuando el material extrudido se puede cortar con la cuchilla acoplada.

Tal y como se indica en la Tabla 4.1. los extrusores de este tipo se utilizan para la fabricación de pasta, cereales de desayuno, almidones modificados, aperitivos, pienso para mascotas o proteína vegetal texturizada, entre otros.

1.3.2. Extrusores de tornillo doble

Constan de dos tornillos de igual longitud situados en el interior del mismo cilindro. En general no se basan en el rozamiento para el transporte del material, sino que actúan como bombas de desplazamiento positivo. Surgieron en los años 70 del pasado siglo, inicialmente en la industria de plásticos, aunque después han sido ampliamente adoptados por la industria de alimentos. Son más complejos que los de tornillo simple, pero proporcionan mucha más versatilidad y un mejor control de las variables del proceso de extrusión, principalmente del tiempo de residencia y la cizalla. Por ello permiten obtener productos muy variados e innovadores en cuanto a su apariencia.

Se clasifican en función de la posición de un tornillo respecto al otro, que varía desde completamente engranados hasta totalmente separado, y de la dirección de giro de los mismos. Si ambos tornillos giran en la misma dirección se denominan corrotativos, y en el caso contrario contrarrotativos. En la práctica existen todas las combinaciones físicamente posibles de estas dos opciones, lo que conduce a una gran variedad de equipos con capacidades y aplicaciones muy diferentes. Las diferentes posibilidades se sintetizan en la Figura 4.3.

Cuando ambos tornillos están engranados y giran en distinto sentido, el contenido de cada tornillo no se mezcla con el otro, lo cual es útil para productos de baja viscosidad (jaleas, goma de mascar), pero no son adecuados para productos expandidos. Por su parte si giran en el mismo sentido permiten que la masa circule de un tornillo al otro, lo que proporciona muy buen grado de mezcla. Estos son los más utilizados en la industria de los alimentos, y son aptos para los productos expandidos.

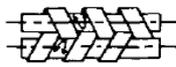
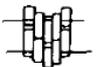
SCREW ENGAGEMENT		SYSTEM	COUNTER-ROTATING	CO-ROTATING
INTERMESHING	FULLY INTERMESHING	LENGTHWISE AND CROSSWISE CLOSED	1 	2 THEORETICALLY NOT POSSIBLE
		LENGTHWISE OPEN AND CROSSWISE CLOSED	3 THEORETICALLY NOT POSSIBLE	SCREWS 4 
		LENGTHWISE AND CROSSWISE OPEN	5 THEORETICALLY POSSIBLE BUT PRACTICALLY NOT REALIZED	KNEADING DISKS 6 
	PARTIALLY INTERMESHING	LENGTHWISE OPEN AND CROSSWISE CLOSED	7 	8 THEORETICALLY NOT POSSIBLE
		LENGTHWISE AND CROSSWISE OPEN	9A 	10A 
			9B 	10B 
NOT INTERMESHING	NOT INTERMESHING	LENGTHWISE AND CROSSWISE OPEN	11 	12 

Figura 4.3. Diferentes configuraciones de los extrusores de doble tornillo (Gray y Chinnaswamy, 1995).

1.4. Ventajas de la extrusión para el procesamiento de alimentos:

La extrusión es imprescindible o casi insustituible para obtener algunos productos alimenticios, especialmente aperitivos o golosinas de nueva generación, que no se podrían producir de otra forma. En otras ocasiones existen procesos alternativos, pero aún en estos casos la extrusión siempre conlleva una serie de ventajas, que podrían resumirse en los siguientes aspectos:

- Versatilidad: Es posible obtener una gran variedad de productos cambiando ingredientes minoritarios, condiciones de operación e incluso la boquilla final del extrusor.
- Eficiencia energética: Los extrusores operan con una humedad relativamente baja, lo que reduce la energía necesaria para el posterior secado.

- Menor coste: La extrusión presenta un menor coste en mano de obra, materias primas y equipos que otras operaciones de cocción y moldeado tradicional. Además requiere menos espacio por unidad de operación.
- Alta productividad en continuo.
- Ausencia de efluentes: Produce pocas o ninguna corriente residual.
- Productos de alta calidad: La extrusión es un proceso de calentamiento HT/ST con lo que al tiempo que se minimiza la degradación de los nutrientes, se consigue aumentar la digestibilidad de proteínas (por desnaturalización) y del almidón (por gelatinización).

2. Cereales de desayuno

Son preparados alimenticios a base de cereales, cuya finalidad es la de proporcionar una alternativa de desayuno rápida y nutritiva. Permiten un aporte calórico bajo en grasa y rico en carbohidratos complejos, que es considerado como muy adecuado por expertos nutricionistas y organismos internacionales. Pueden ser fabricados a partir de diferentes cereales: maíz, trigo, arroz y avena, aunque son las reacciones que se producen durante la cocción, como las de Maillard, las responsables por el sabor característicos, ya que el grano de cereal es en sí insípido. En ocasiones también se les incorporan jarabes de glucosa, chocolate, frutas, malta, etc. e incluso se les complementa con diferentes vitaminas y minerales.

2.1. *Historia y clasificación.*

Históricamente tienen su origen en los Estados Unidos de América, donde los hermanos Kellogg, C.W. Post y otros, desarrollaron numerosos procesos para convertir los granos de cereal crudo en un producto agradable que pudiera consumirse de forma directa. En un principio estaban dirigidos a enfermos o personas que necesitaban una alimentación especial, pero con el tiempo se popularizaron, en parte gracias a la aparición de hábitos de vida más sedentarios en la población, para lo que constituyen un desayuno ideal.

En función de su forma de consumo pueden distinguirse dos grandes categorías de cereales para desayuno:

- a. *Cereales instantáneos (Ready-to-Eat Cereals ó RTE)*: Se pueden consumir directamente, bien solos, o con leche fría, zumos de fruta o lácteos fermentados, puesto que no necesitan cocción previa al haber ya sido completamente “cocinados” durante su proceso de producción. A esta clase pertenecen la mayoría de los cereales para desayuno, como los copos de maíz o el arroz inflado.

b. *Cereales para cocinar (Hot Cereals)*: A este grupo, más minoritario, pertenecen aquellos productos que requieren una cocción previa, aunque sea por poco tiempo, en agua o leche antes de poder ser consumidos. El casi único ejemplo son los copos de avena.

2.2. *Procesos de producción.*

Los procesos para la fabricación de los cereales de desayuno se pueden dividir en dos grandes tipos, los **métodos clásicos**, que no usan extrusores de tornillo, o los **métodos modernos**, que sí los utilizan.

En los métodos clásicos la homogeneización y cocción de la masa tiene lugar en un equipo independiente, aunque se utilicen luego extrusores de rodillo para dar al producto su forma final, y algún otro procedimiento, como la fritura o el secado/tostado, para provocar la expansión o retirar la humedad del producto. Por su parte, en los métodos modernos, tanto la cocción como el moldeado del producto tienen lugar en el propio extrusor, lo que sólo es posible en los de tornillo.

Todos los productos que se obtienen mediante métodos clásicos pueden obtenerse por extrusión, pero no a la inversa, lo que junto con las ventajas de la extrusión ya enumeradas, hace que los métodos clásicos se encuentren en desuso. A continuación veremos como ejemplo el proceso de producción de copos de maíz (“corn flakes”), tanto en su forma clásica como por extrusión.

2.2.1. Producción de copos de maíz. Proceso clásico

El proceso clásico parte de los granos de maíz crudos, y consta de las etapas que se sintetizan en el diagrama de bloques de la Figura 4.4.

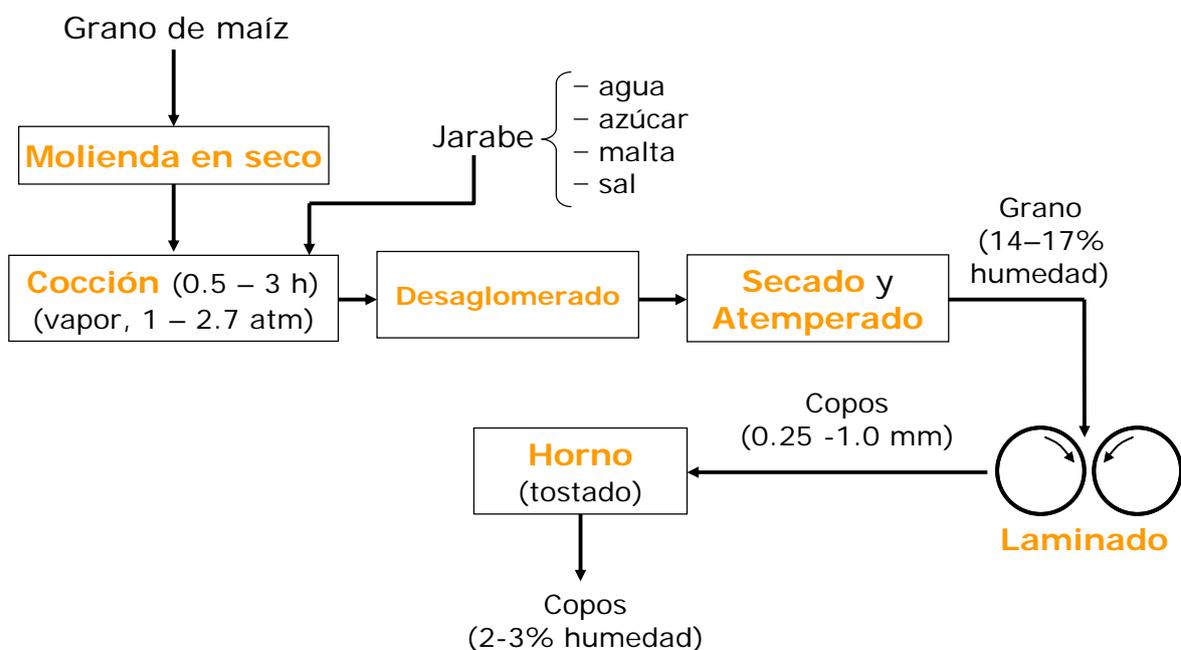


Figura 4.4. Diagrama de bloques del proceso de producción clásico de copos de maíz.

En la primera etapa el maíz procedente directamente del campo, donde se recoge ya parcialmente seco, se somete a una **molienda en seco** cuyos objetivos son retirar el germen, muy rico en aceite que podría provocar enranciamiento del producto, así como la cáscara, muy rica en fibra que ocasiona problemas durante el laminado. El resultado es un grano de aproximadamente un tercio del tamaño original. Cada uno de estos granos dará lugar a un copo, una vez laminado.

La siguiente etapa es la **cocción** de los granos, lo que se lleva a cabo en un licor que contiene agua y otros componentes que son muy importantes para el desarrollo del sabor, como son azúcares, jarabe de malta y sal. El jarabe de malta contiene, además de azúcares, proteínas y aminoácidos que provocan reacciones de pardeamiento no enzimático, fundamentales en el desarrollo del sabor de los copos de maíz. Para la cocción se usan tanques rotatorios horizontales, construidos en acero inoxidable y aislados, a los que se adiciona vapor axialmente. Dichos equipos operan de forma discontinua.

A la salida del tanque de cocción es frecuente que algunos granos se hayan aglomerado, por lo que se hace necesario separarlos. El **desaglomerado** se lleva a cabo mediante inyección de aire, que seca la superficie de los granos, en unos equipos consistentes en dos tambores contrarrotativos suficientemente próximos, que tienen prolongaciones en forma de dedo en su superficie, de modo que las de ambos tambores se “engranen” entre sí. De esta manera los grupos de granos que entran entre las prolongaciones se rompen antes de salir.

A continuación se lleva a cabo el **secado** de los granos. El grano cocido presenta un contenido en humedad de 28–34%, demasiado alto para ser laminados, por lo que es necesario reducirlo al 14–17%. Para ello se usan secaderos con aire caliente (121°C), y que básicamente consisten en un túnel, a través del cual los granos son conducidos mediante una cinta transportadora. Es muy importante que en esta etapa no se tueste la superficie del grano, por lo que hay que vigilar cuidadosamente los parámetros del proceso. A la salida del secadero se enfrían los granos a temperatura ambiente, para proceder al **atemperado**. Este consiste básicamente en dejar los granos reposar para que se equilibre completamente la humedad interior y exterior de los granos. Durante esta etapa se produce también una cierta retrogradación del almidón que es básica para un correcto laminado. El laminado se lleva a cabo en cintas u otros transportadores a muy baja velocidad, de forma que a la salida, ya haya pasado el tiempo necesario, que va desde 3 horas a 24, en función del secadero utilizado.

Ya es posible proceder al **laminado** de los granos atemperados, lo que se lleva a cabo en un laminador que consta básicamente de dos rodillos o cilindros metálicos que giran en sentido opuesto, uno hacia el otro, haciendo que los granos pasen por su espacio intermedio, que es

regulable. El interior de los rodillos es hueco, lo que permite pasar agua para refrigerar la superficie, que se suele calentar por la presión de los granos.

Una vez formados, vía transporte neumático, los copos son conducidos a una criba en la que se separan los que tienen un tamaño no deseado, mientras que el resto de los copos es conducido a un horno para proceder al **tostado** de los mismos. El tostador puede ser un tambor rotativo que trabaja con aire caliente, aunque se pueden usar también hornos de lecho fluidizado, en los que la propia corriente de aire suspende los copos, que se desplazan por el interior en un cinta transportadora. La temperatura máxima del aire es de 315°C, lo que produce la formación de burbujas en la superficie de los copos y proporciona el color dorado característico, además de provocar reacciones de caramelización que contribuyen al sabor de los productos.

A la salida del tostado es posible añadir vitaminas, que no habrían resistido las altas temperaturas del proceso de producción, así como azúcar o aromas, lo que se hace pulverizando sobre los copos la solución que los contiene. Ya sólo resta el empaquetado, que es una parte esencial del proceso para permitir la conservación de las propiedades del producto durante su almacenamiento.

2.2.2. Producción de copos de maíz mediante extrusión

En este proceso no se parte de granos desgerminados y descascarillados como en el caso anterior, sino de harinas de maíz, las cuales son cocidas y moldeadas en un extrusor de tornillo. La masa cocida es cortada a la salida del extrusor para formar unos pellets, que luego se atemperan y laminan, al igual que los granos en el proceso tradicional. Según las condiciones de trabajo en el interior del extrusor es posible desarrollar diferentes propiedades en el producto final. Así por ejemplo, si la presión y la temperatura son altas en el troquel, la brusca descompresión a la salida, dará lugar a productos expandidos, (inflados).

Una importante ventaja de este proceso es que se pueden mezclar harinas de diversa procedencia, con lo que es posible obtener una mayor gama de productos y aprovechar harinas de diversas calidades. Otra de sus ventajas es que al sustituir varios equipos por el extrusor, reduce mucho las necesidades de espacio de la planta y la inversión en inmovilizado.

3. Aperitivos de cereal (“snacks”)

Los aperitivos o “snacks” son alimentos ideados para ser consumidos por placer o como complemento energético o nutritivo, pero no constituyen por sí mismos ninguna de las principales comidas del día. El cambio en los hábitos de vida y el establecimiento de una cultura en la que el ocio y el bienestar adquieren mucha más importancia, determinan un creciente consumo de este

tipo de productos, cuyo atractivo y éxito comercial se basa principalmente en la elección de los aromas adecuados, que les confieren gustos muy diversos: jamón, queso, barbacoa, etc.

Aunque estudiaremos exclusivamente los aperitivos o snacks de cereal, una gran variedad de alimentos (tubérculos, carne, pescado, etc.) pueden ser industrialmente transformados en snacks, utilizando procedimientos similares a los que describiremos.

3.1. *Procesos de producción.*

Desde el punto de vista de proceso, los aperitivos de cereal se parecen mucho a los cereales de desayuno, aunque en el proceso de extrusión de los snacks se trabaja con menores contenidos de humedad y mayores esfuerzos de cizalla y temperaturas. Esto conduce a productos más expandidos, con un grado de transformación mayor que el de los cereales para desayuno, y que casi se “disuelven” en la boca.

De cualquier forma, existe una variedad de procesos para la producción de aperitivos de cereal, que también podemos clasificar en procesos clásicos y modernos, en función de que usen o no el cocinado por extrusión (extrusores de tornillo). Veremos a continuación ejemplos de cada uno de estos métodos.

3.1.1. Producción de snacks de cereal por métodos clásicos.

Se trata de procesos que no utilizan la extrusión, como es el caso de la producción de granos inflados (trigo, arroz o maíz), o bien procesos que sí que la usan, pero sólo para moldear el producto, como es el caso de la producción de productos laminados, como los triángulos o tiras de maíz.

- **Cereales inflados** (ver Figura 4.5.): Para este proceso es importante que los granos sean de gran calidad. Una vez limpio y sin cáscara el grano se **acondiciona** con calor seco durante unos minutos a una temperatura de 90-100°C, en un tambor de acero inoxidable, calentado exteriormente y con palas de avance para el producto.

De ahí el grano pasa a una **cámara de acero presurizada**, que se conocen como “pistolas”, donde calienta aproximadamente a 210°C con vapor a alta presión. Una vez se alcanza la temperatura prefijada así como la presión y permanencia, el producto cae en una **cámara de expansión**. La súbita descompresión produce una detonación característica, que es la que le da a estos dispositivos su nombre. Desde la cámara de expansión, vía transporte neumático, el producto se lleva a una **clasificación**. Normalmente se obtienen tres fracciones, 60% producto inflado al que se adiciona miel, azúcar o chocolate y se envasa, 20-25% se emplea en pastelería e industria chocolatera. La fracción restante se emplea para alimentación animal.

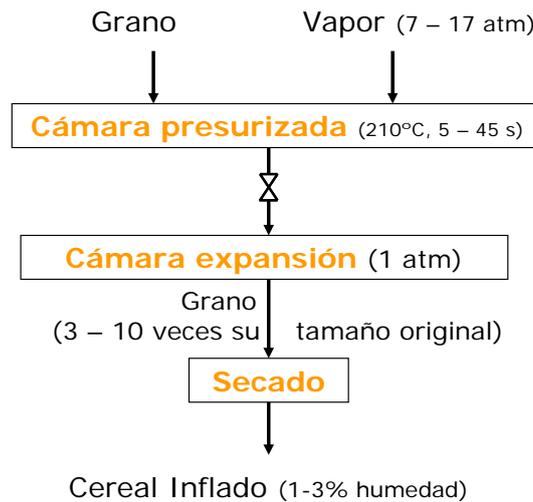


Figura 4.5. Diagrama de bloques del proceso de producción de snacks inflados.

- **Cereales laminados:** Se parte de granos a los que se les elimina la cáscara o de harinas, a partir de los cuales se obtiene una masa homogénea. La masa se pasa a través de dos rodillos contrarrotativos, que la laminan y cortan las formas deseadas (triángulos o tiras). A continuación, una vez separados, se hornea el producto y a continuación se fríe, para que desarrolle su sabor y textura característicos. La última etapa consiste en la adición de aromas y sal, para darle al producto el sabor deseado. Como puede verse, aunque se utiliza la extrusión en el proceso de producción, su papel es únicamente el de laminar la masa y cortar en ella las formas deseadas, utilizándose equipos diferentes para todo lo demás.

3.1.2. Producción de snacks de cereal mediante extrusión.

En este grupo incluimos aquellos procesos en los que el extrusor realiza la cocción y el moldeado de la masa, generando productos prácticamente terminados, a falta de un secado final. El producto más característico de los así obtenidos son los aperitivos expandidos tipo “gusanitos” de maíz, Cheetos®, etc. Un diagrama de bloques del proceso de producción lo tenemos en la Figura 4.6.

Como en casi todos los procesos que usan la cocción por extrusión, la materia de partida son harinas de cereal a las que se añade la cantidad deseada de agua, con la que se mezclan en el preacondicionador, previamente a su paso al extrusor. Se suelen emplear extrusores de tornillo simple, particularmente de la clase “Collet” (ver Tabla 4.1), que son de cámara corta pero elevada cizalla, con lo que calientan la mezcla a altas temperaturas (hasta 200°C), lo que favorece la expansión a la salida del troquel. El snack expandido sigue conservando una cierta humedad, con lo que es necesario secarlo, lo que se hace normalmente en un horno con aire caliente. La última etapa,

como es lo habitual, consiste en recubrir el producto con aceite vegetal que incorpora los aromatizantes que se desee.

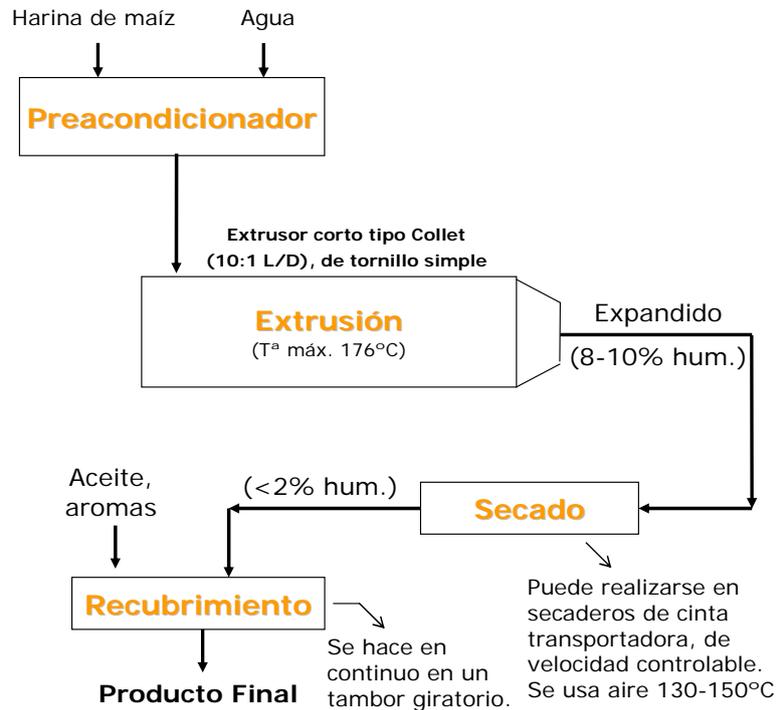


Figura 4.6. Diagrama de bloques del proceso de producción de snacks expandidos.

Bibliografía:

Capítulos de libro

- Culbertson, J.D., Grain, Cereal: Ready-to-Eat Breakfast Cereals, en Food Processing: Principles and Applications, J. Scott Smith y Y. H. Hui (Ed.), Blackwell Publishing, 2004
- Fizzell, D., Coccodrilli, G., Cante, C.J., Breakfast Cereals, en Wiley Encyclopedia of Food Science and Technology, F.J. Francis (ed.), John Wiley & Sons, 2000
- Gray, D.R. y Chinnaswamy, R., Role of Extrusion in Food Processing, en Food Processing: Recent Developments, A.G. Gaonkar (Ed.), Elsevier Science, 1995

Obras completas

- Extrusión de los alimentos. R. Guy (Ed.) Ed. Acribia, 2001.
Manual muy completo sobre la extrusión, con temas específicos sobre cereales de desayuno y aperitivos.