

EXTRUSIÓN DE ALIMENTOS

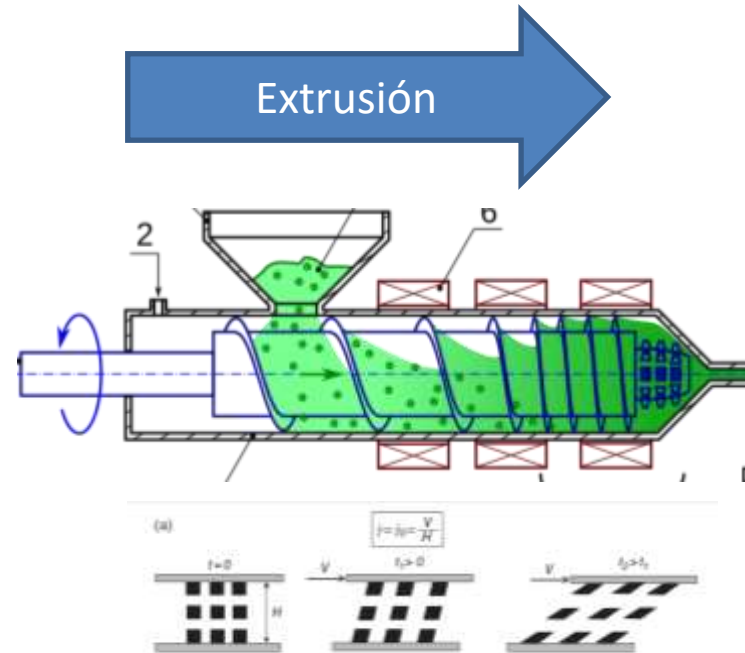


Tecnología de los Alimentos
Ingeniería Química - FCEFyN-UNC
Dr. Pablo Daniel Ribotta

e-mail: pdribotta@unc.edu.ar

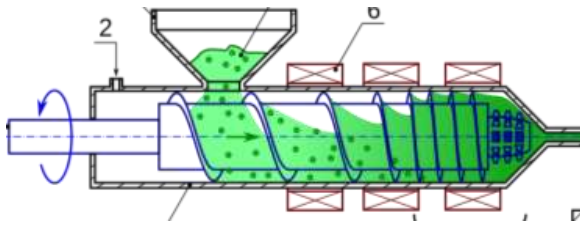
EXTRUSIÓN "extrudere" (latín): forzar un material a través de un orificio

La extrusión de alimentos es un proceso en el que un material (sémola, harina o subproducto) es forzado a fluir a través de una boquilla



Sistema de procesamiento continuo con capacidad de **transportar, mezclar, cizallar, cocer (transformar), formar y moldear** alimentos a medida que se a medida que se procesan





OBJETIVOS: formado, amasado, estructuración, cocción, pasteurización, expansión, reducción de humedad, homogeneización y reestructuración

Características del proceso de extrusión

Proceso realizado en una etapa (operaciones simultáneas)

Flexibilidad de operación (diversidad de objetivos y formulaciones / productos)

Alta velocidad de producción y automatización

Compacto y bajo costo de procesamiento

Eficiente utilización de la energía

Ausencia de efluentes

Inactivación de enzimas y factores antinutricionales

Producción de alimentos inocuos

Mejora la digestibilidad de almidones y proteínas

Alta temperatura, tiempos cortos: minimiza la degradación de los nutrientes

USOS ALIMENTACION HUMANA

Cereales de desayuno listos para comer

Snacks (aperitivos salados y dulces)

Alimentos para bebés

Rebozadores y coberturas

Proteínas vegetales texturizadas - Sustitutos de carne

Harinas compuestas y enriquecidas

Sustitutos lácteos

Almidones modificados

Pastas (fideos)

Bebidas en polvo

Ingredientes de sopas

Galletitas



ALIMENTACION ANIMAL

Cereales, oleaginosas y legumbres precocidas o ingredientes para alimentos balanceados

Alimentos para mascotas, rumiantes, cerdos, aves, peces, etc.

Procesamiento de subproductos/desechos de la industria:

Residuos de la industria de la pesca, de aves, cerdos ...

Residuos de la industrialización de lácteos, pan y frutas

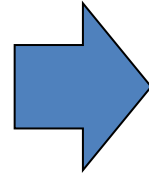


Orujo (transformación de frutas y hortalizas), cáscara/salvado (molturación de cereales), torta (extracción de aceite), bagazos (azúcar, cerveza, jugos, bebidas....)



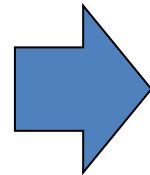
SISTEMAS DE EXTRUSIÓN

Método de operación



Extrusión en frío
Extrusión en caliente

Método de construcción



Monotornillo
Doble tornillo

EXTRUSIÓN EN FRÍO

Temperaturas < 100°C

Se produce: mezclado, dispersión, disolución, amasado, cohesión y formado

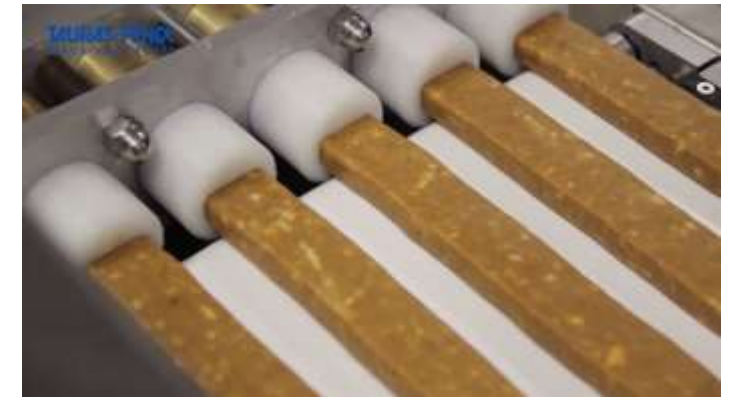
No hay incorporación de energía térmica extra (refrigerados)

No hay expansión y mínima fricción



Ejemplos: pastas italianas, masas de panadería, salchichas, derivados del surimi, caramelos, aimentos para animales, etc.

Características: tornillo con profundas paletas, baja velocidad, superficie del cilindro lisa (evitar fricción y calentamiento excesivo).



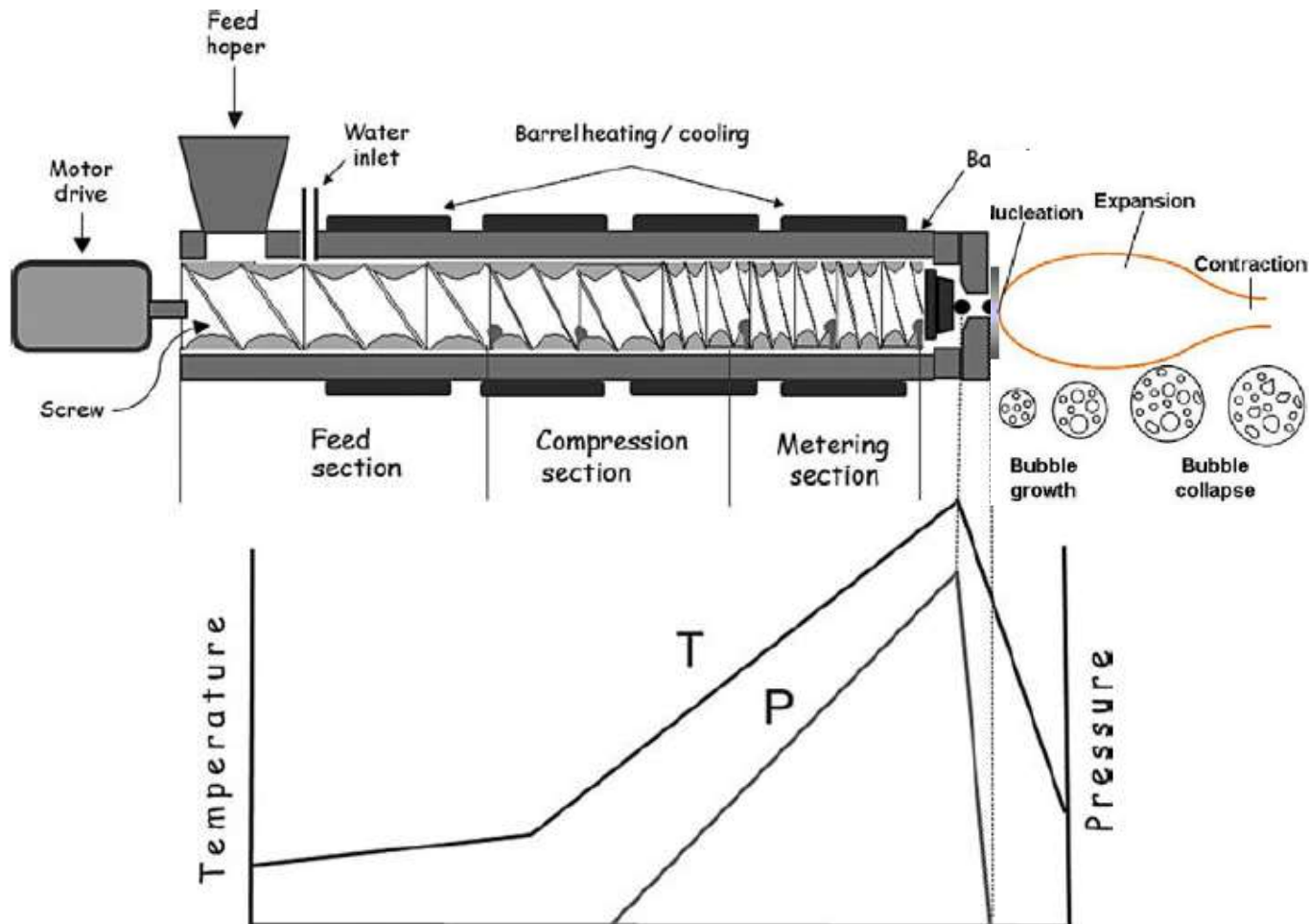
<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=GDNsn10GuJs>

https://www.youtube.com/watch?v=wjq_T96wvPM

<https://www.youtube.com/watch?v=Hr9OSgAXqUo>

EXTRUSIÓN EN CALIENTE

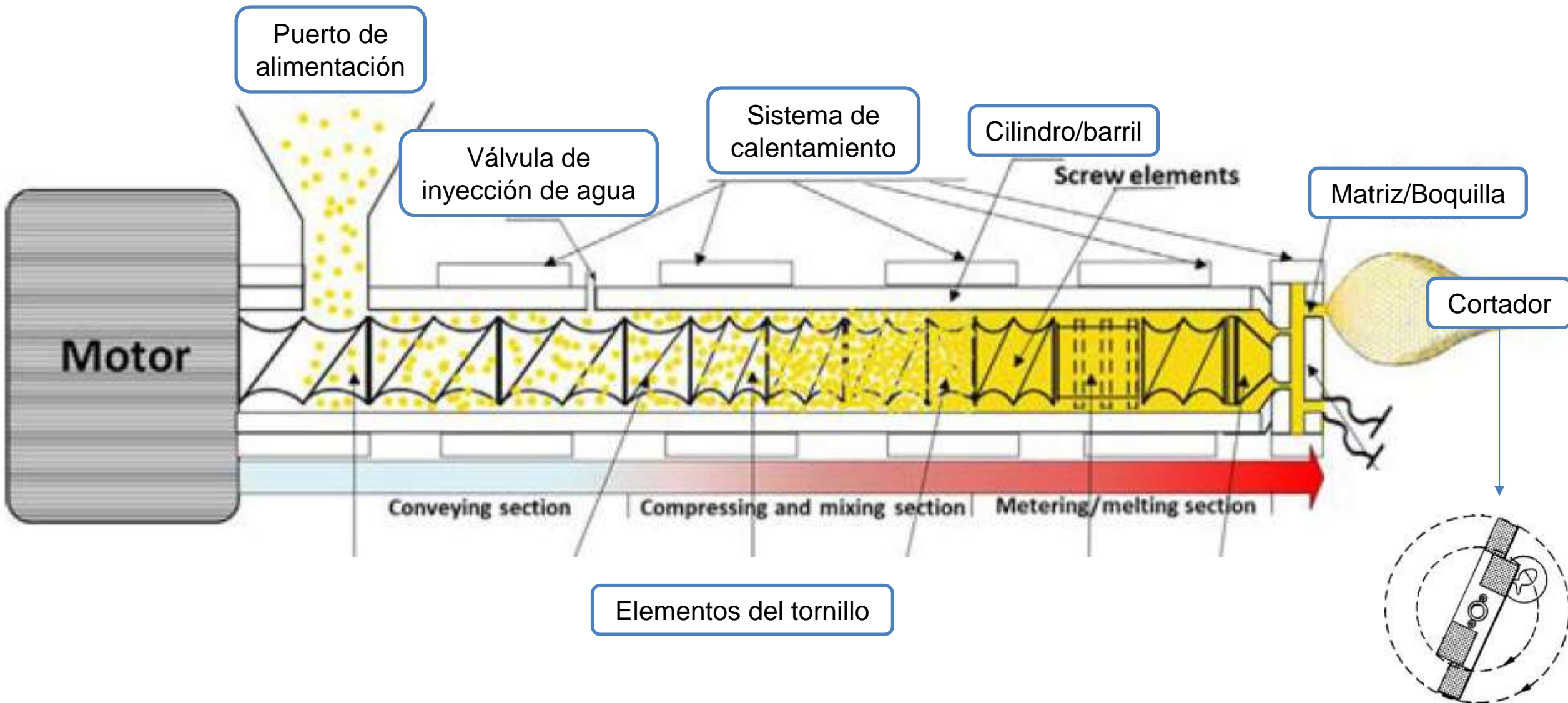
Proceso de **moldeado y cocción continua** debido la acción de **fuerzas de fricción y cizallamiento** sobre un sólido/fluido **sobrecalentado** y a **presión elevada**, contenido entre una **camisa/cilindro** y una **tornillo móvil** que lo expulsa de manera sostenida y controlada por un **orificio (boquilla)**, generando un proceso de expansión (presión atmosférica) y moldeado



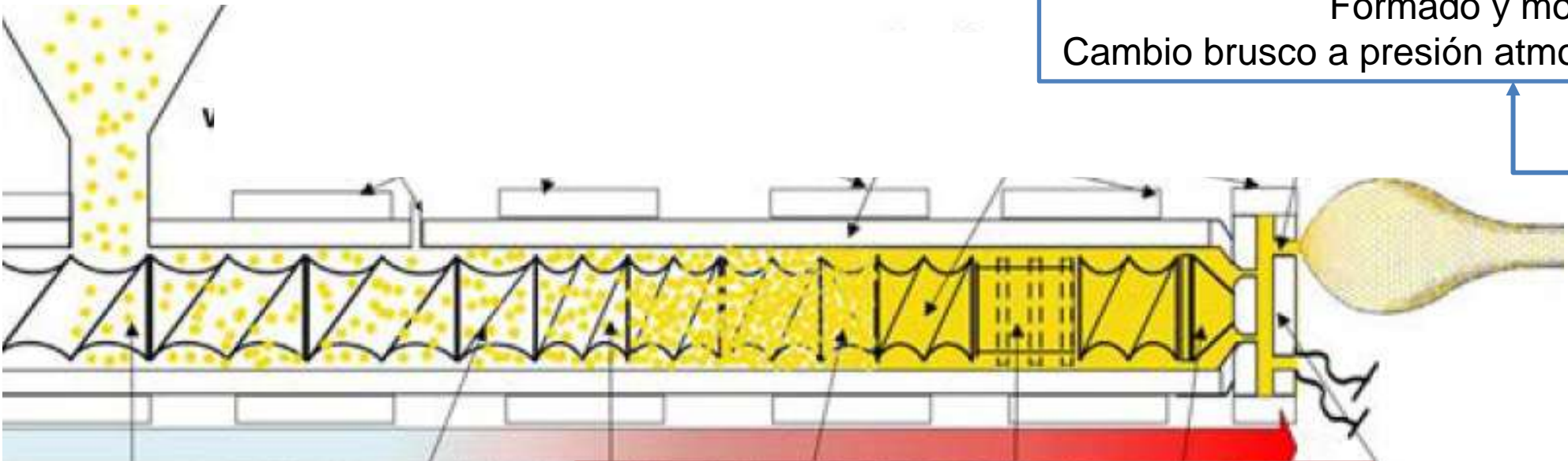
Energía térmica: fuente externa (resistencia o vapor) y/o generada por la fricción en las superficies internas de la extrusora en contacto con el producto extruido

Completado por algún sistema de corte para obtener tamaño final deseado

Diseño general de un extrusor de alta temperatura



Diseño general de un extrusor de alta temperatura



Diseñada para restringir el flujo.
Formado y moldeado.
Cambio brusco a presión atmosférica (y enfriamiento)

Zona de transporte y mezcla

Zona de amasado, cizallamiento,
(calentamiento), material comienza a "fundir"

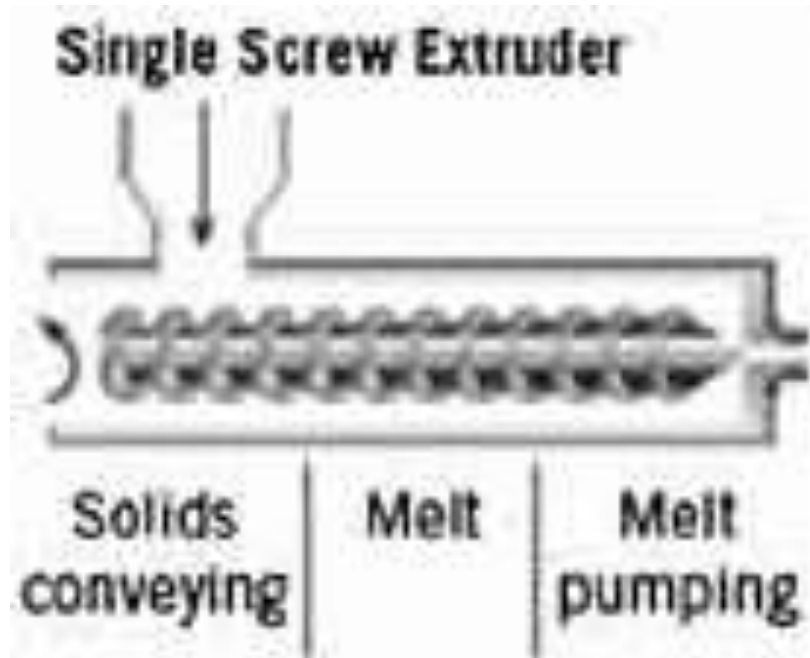
Boquilla



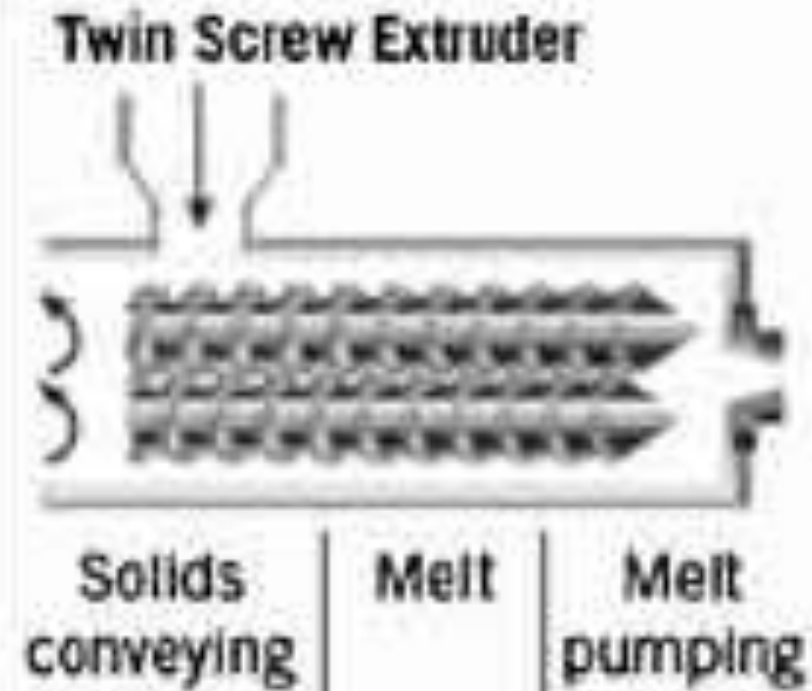
Gran paso y volumen

Paso corto/cambio de dirección/restricción: compresión, generación de calor por rozamiento y cizallamiento entre partículas de alimento y tornillo/barril, aumento de presión (y temperatura)

Monotornillo



Doble tornillo



Monotornillo

Un tornillo cilíndrico que gira en un cuerpo cilíndrico ranurado (aleaciones duras/acero inoxidable endurecido para resistir el desgaste por fricción)

Tornillo accionado por **motor eléctrico** (velocidad variable y potencia para bombear el alimento contra la presión generada en el cilindro)

Las velocidades típicas: 150-600 rpm.

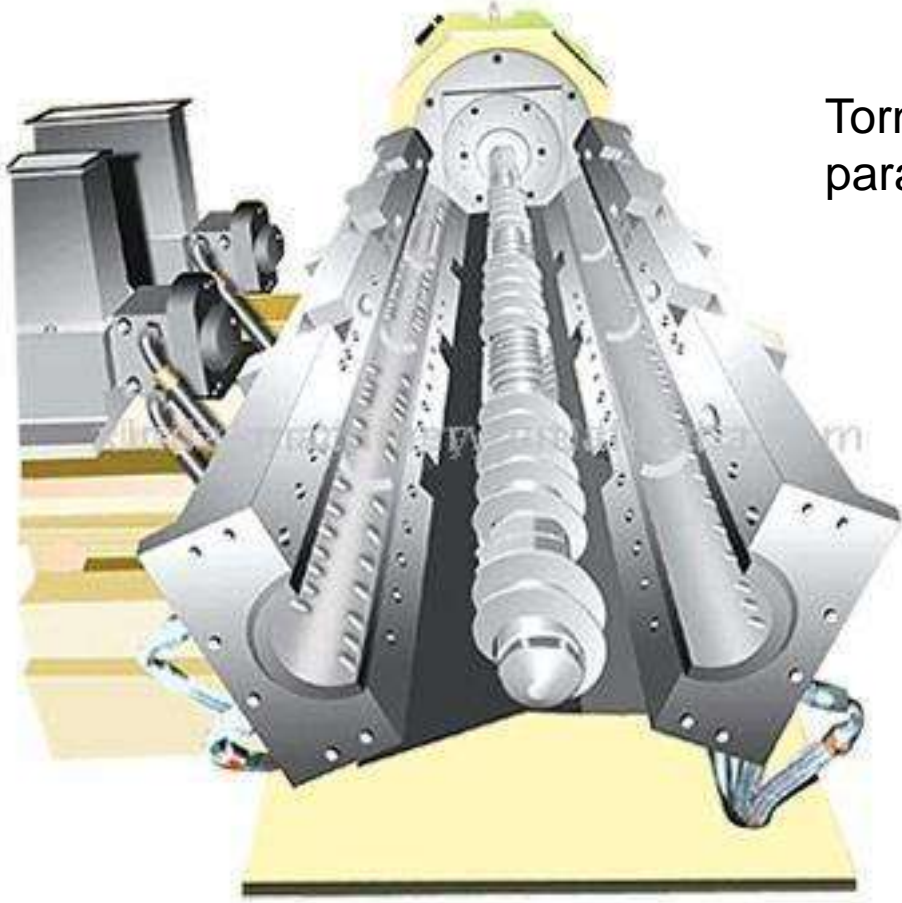


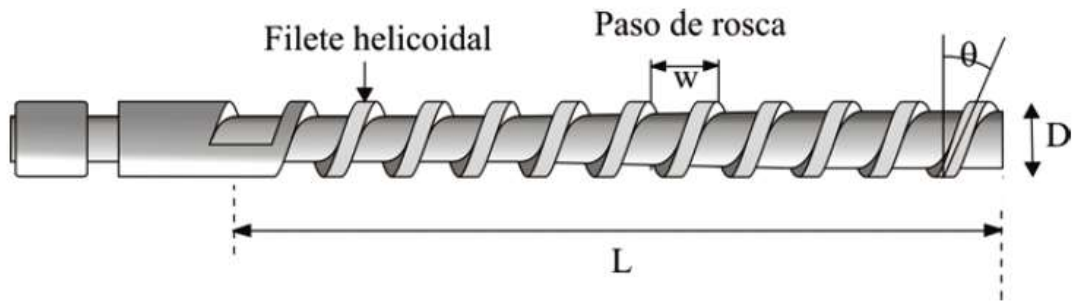
Fuerte rozamiento, desgaste del cilindro, flujo de retroceso (álabes del cilindro y superficie del cilindro),

Barato (productos de bajo valor),

Limitación en la formulación

La relación de longitud:diámetro del cilindro entre 2:1 y 25:1

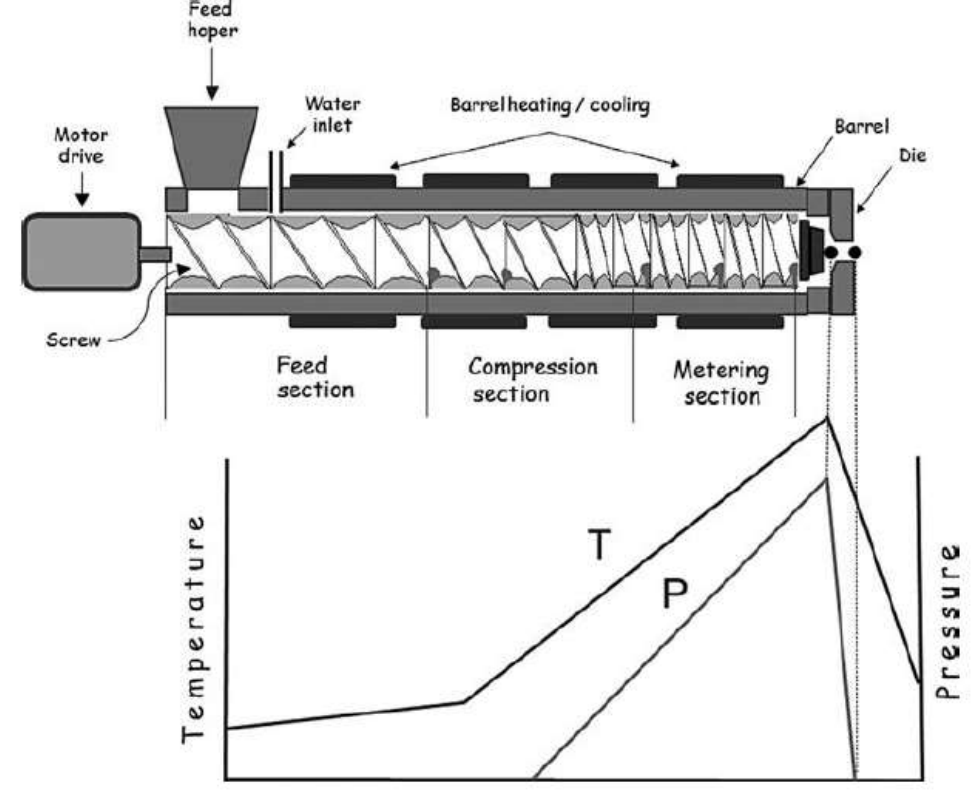




Características de flujo:

Flujo hacia delante: causado por la acción del tornillo

Flujo hacia atrás: se produce entre los alabes y la superficie del cilindro y es el resultado del aumento de la presión como consecuencia del movimiento del material de una sección de la extrusora a la siguiente.



Rendimiento de la extrusora: paso y diámetro del tornillo, número de álabes y distancia alabes y cilindro.

La **velocidad del tornillo** principal factor que influyen en el rendimiento de la extrusora: tiempo de residencia del producto, calor generado por fricción, tasas de transferencia de calor y de la cizalla sobre el producto.

Tipos de extrusores

Baja cizalla: superficies lisas de cilindros, canales de flujo relativamente grande, y bajas velocidades de tornillo. Pasta, derivados de carnes y gomas.

Moderada cizalla: superficies acanaladas de cilindro, canal de flujo reducido (secciones transversales) y velocidades moderadas tornillos. Pan rallado, alimento mascotas semi-húmedo

Alta cizalla: altas velocidades de tornillo, tornillos de paso variable y de con vuelos de distinta profundidad y superficies acanaladas barril. Texturización de proteínas, cereales desayuno y snacks (expandidos)

Condiciones de operación

Table 14.2 Operating data for different types of extruder

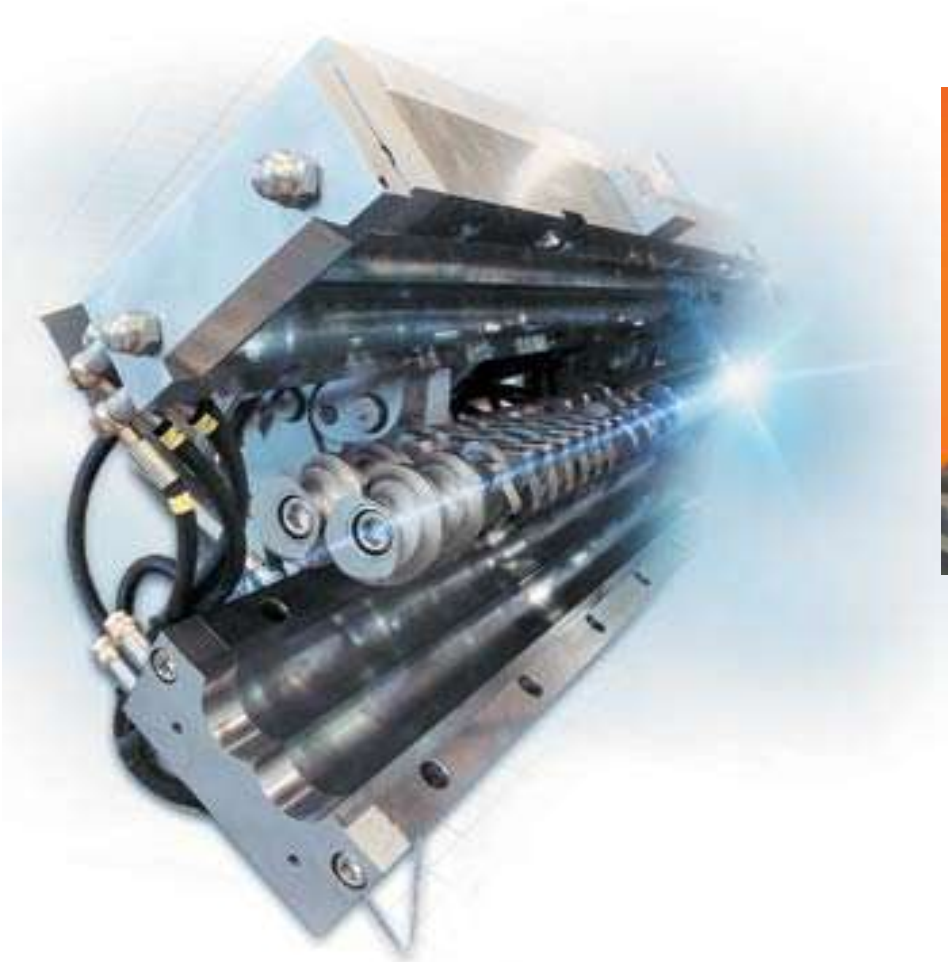
Parameter	High shear	Medium shear	Low shear
Net energy input to product (kWh kg ⁻¹)	0.10–0.16	0.02–0.08	0.01–0.04
Barrel length:diameter (L/D)	2–15	10–25	5–22
Screw speed (rpm)	> 300	> 200	> 100
Maximum barrel temperature (°C)	110–180	55–145	20–65
Maximum product temperature (°C)	149	79	52
Maximum barrel pressure (kPa)	4000–17 000	2000–4000	550–6000
Product moisture (%)	5–8	15–30	25–75
Product density (kg/m ³)	32–160	160–500	320–800

Adapted from Hauck (1993) and Harper (1979).

Doble tornillo-Tornillos

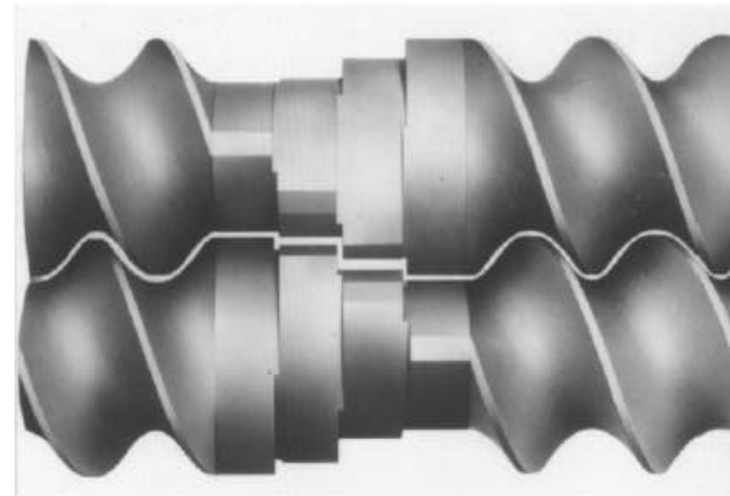
gemelos

Sistemas de extrusión que poseen dos tornillos paralelos en el cilindro del extrusor



Los tornillos de extrusoras de doble tornillo giran formando una "figura de 8" en el cilindro.

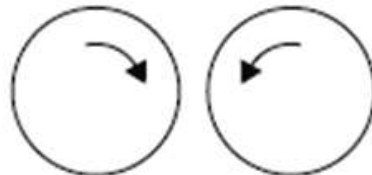
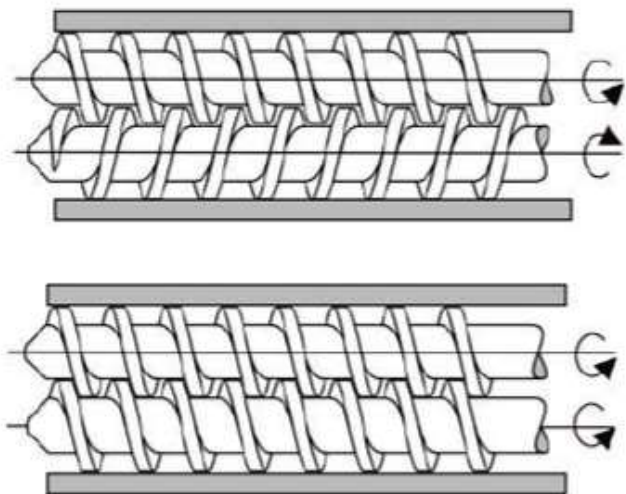
Tornillos engranados



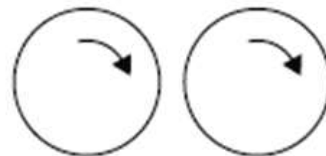
Perfil de ajuste de tornillo

Relación L:D del tornillo: 10:1 y 40:1

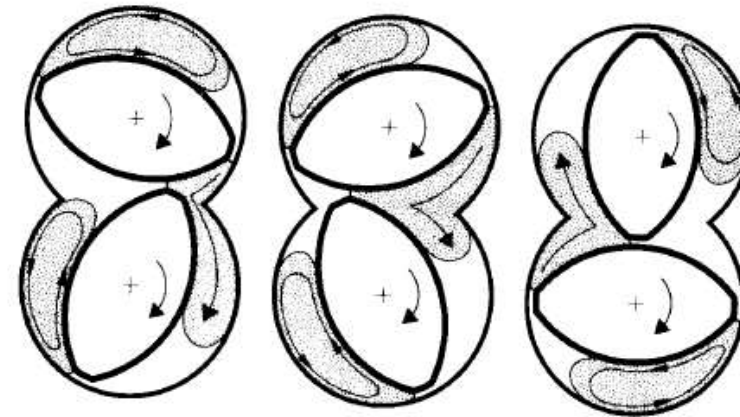
Se clasifican de acuerdo a la dirección de rotación y la forma en que la engranan tornillos



Counter-rotating



Co-rotating



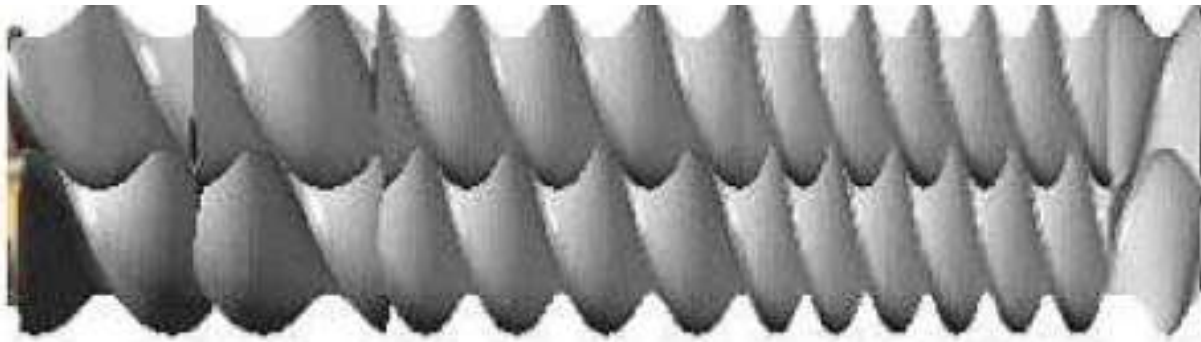
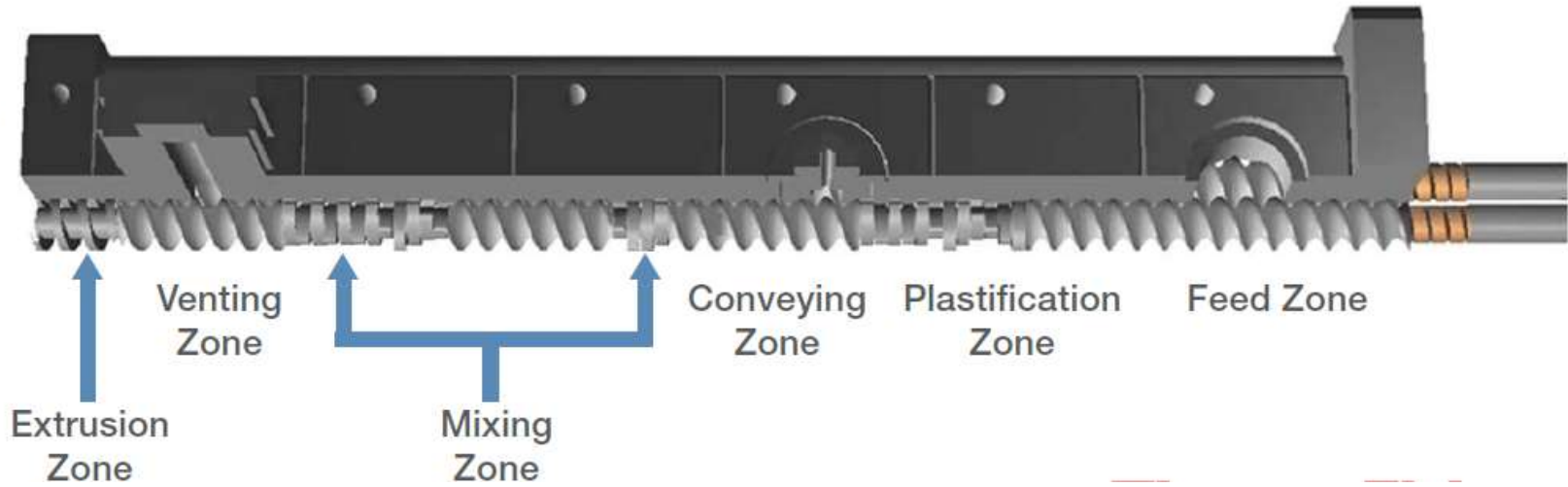
Movimiento de material

Co-rotación de los tornillos engranados, que son auto-limpiantes (los álabes de un tornillo barren el alimento del tornillo adyacente).

Aplicaciones de procesamiento de alimentos.

Elementos del tornillo

Figure 1:
Barrel and screw layout



Transporte y mezcla



Amasado, cizallamiento



Extrusión

Tornillo simple	Doble tornillo
Producción: debe estar lleno de material para funcionar eficazmente	Independiente de la velocidad de alimentación Menor fluctuaciones de la velocidad de producción por acción de desplazamiento positivo de los tornillos
Pobre eficiencia de mezclado	Excelente eficiencia de mezclado
Restricciones (mara mejorar cizalla y mezclado) reduce el rendimiento	Desplazamiento positivo produce mayores tasas y mejor control de la transferencia de calor
Limitaciones de formulación que afecta la energía mecánica aplicada:	
Grasa $\leq 9\%$; Azúcar $\leq 10\%$; Humedad $\leq 30\%$ MENOR FLEXIBILIDAD	Grasa $\leq 20\%$; Azúcar $\leq 40\%$; Humedad $\leq 65\%$ MAYOR FLEXIBILIDAD
Rango específico de tamaños de partículas	Pueden procesar mezclas de tamaños de partículas, desde polvos finos hasta granos
De baja a muy alto torque	limitaciones en el torque máximo, presión, y empuje que se puede lograr (caja de engranajes más compleja)
Bajo costo y menor mantenimiento	Alto costo y mayor mantenimiento

Extrusora doble tornillo adquirida

- Doble tornillo co-giratoria paralela de 11 mm,
- 40 L/D (importante)
- Capacidad hasta 2,5 kg/h.
- Velocidad del tornillo: 10 a 1000 rpm.
- Temperatura máx: 350 °C
- 8 zonas: 1 refrigerada y 7 con regulación de temperatura.

USOS POSIBLES:

Extrusión-cocción de:

Harinas de cereales / almidones
Harinas proteicas (texturizados baja humedad)
Concentrados y aislados de proteínas
Fibras

Aglomeración de matrices



Variables independientes

Características de **materia prima y formulación** (proteínas, almidón, fibra, humedad)

Configuraciones del tornillo

Condiciones de extrusión:

- Alimentación
- Agua en el extrusor
- Velocidad del tornillo
- Temperatura del barril
- Configuración/dimensiones de la boquilla

Proceso

Transformación físico-química: ruptura estructura celular, grado de gelatinización, hidrólisis, desnaturalización y estructuración de proteínas, Maillard-condensación, etc.

Parámetros que describen el proceso

Energía mecánica: Magnitud de la cizalla (diseño del tornillo, velocidad de giro)

Temperatura (cizalla, energía térmica aplicada)

Presión (paso de rosca, humedad, vapor, diámetro de boquilla)

Tiempo de residencia (alimentación, velocidad de tornillo)

Viscosidad

Parámetros del producto

Extrusión modifica: organización molecular y microestructura de los componentes (carbohidratos, proteínas)



Afecta

Comportamiento físico del producto obtenido

Forma Estructura
Densidad Textura
Porosidad Solubilidad
Aspecto Sabor
Absorción

Propiedades nutricionales

Gelatinización almidón (máxima digestibilidad)
Desnaturalización de proteínas
Inactivación inhibidores y factores antinutricionales / alteran gusto
Composición de nutrientes

CONDICIONES DE HTST durante la cocción por extrusión tienen efectos menores sobre el color y el sabor natural de los alimentos.

Configuraciones de tornillo - ejemplos



Cereales modificadas



Snacks expandidos directos



Snacks, cornflakes, alimentos acuáticos – con desgasificación



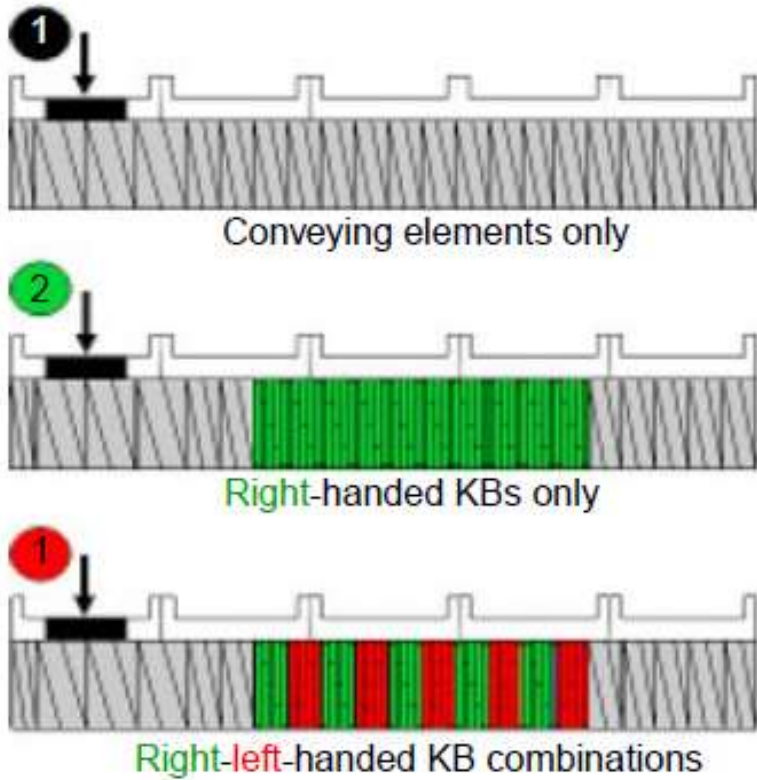
Pasta – con baja EME



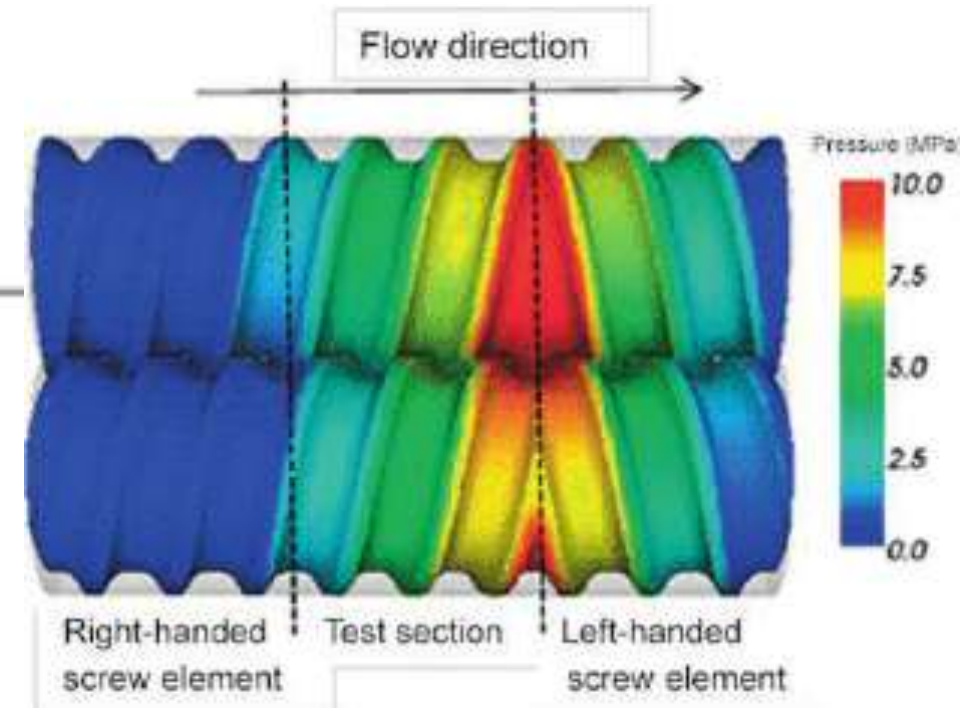
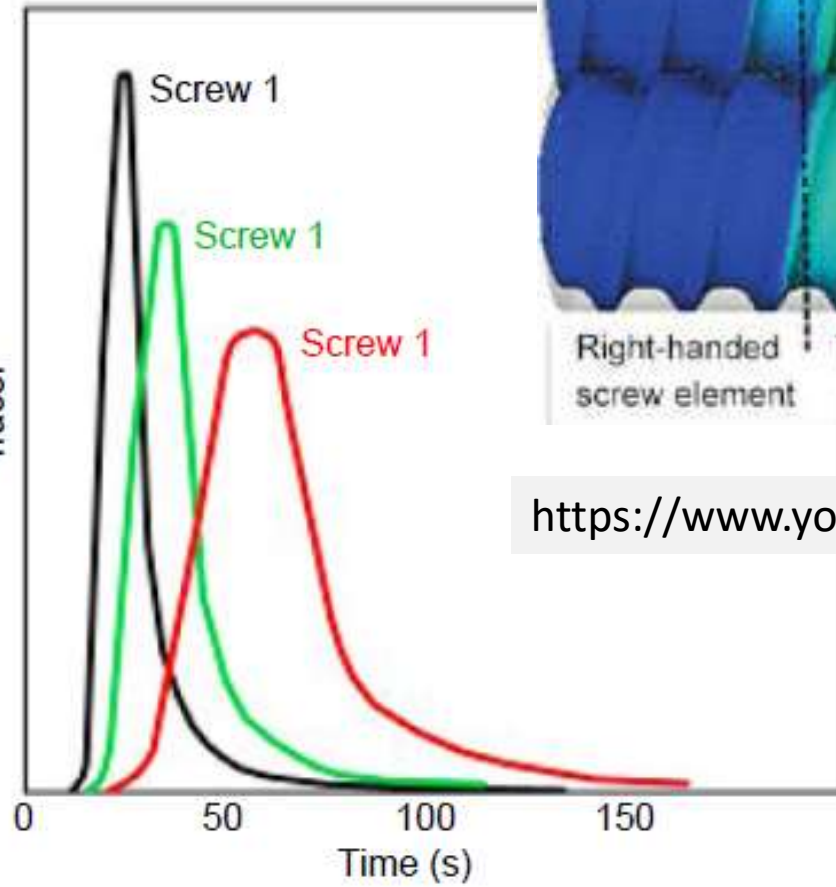
Proteínas texturizadas – con alta EME

Aumento del nivel de restricción

Self-cleaning screw profile
Residence time



Tracer



<https://www.youtube.com/watch?v=GpSu4fSffn0>

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=dEFv8R-FbN0>

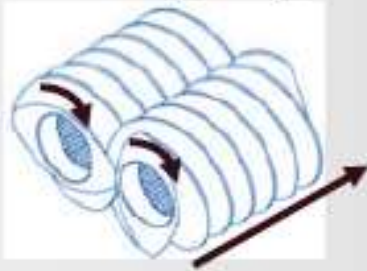
Elementos para un extrusor de doble husillo co-rotante

Table 2.2 Standard modular screw elements and kneading blocks for an intermeshing co-rotating twin screw extruder.

Type of screw elements or kneading blocks

Main characteristics and process functions

Conjugated, double flight, right-handed pitch



- Various pitches and lengths. Low shearing. High free volume
- Used in feed sections (primary and secondary) and transport sections (such as degassing and cooling)

Conjugated, single flight, right-handed pitch

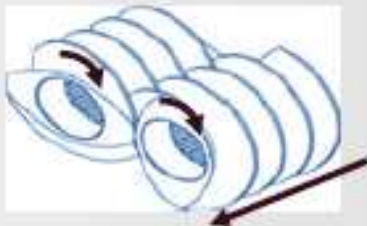


Trapezoidal, single flight, right-handed pitch



- Various pitches and lengths. Low shearing. High pumping capacity
- Used in compression, transport (pressure build-up) and metering section (discharge pressure build-up)

Conjugated, double flight, left-handed pitch



- Various pitches and lengths. Intense shearing. High material retention
- Used in melting and shearing sections. Efficient to create a seal before a degassing section

Elementos para un extrusor de doble husillo co-rotante

Conjugated, single flight,
left-handed pitch



Conjugated, double flight,
left-handed pitch



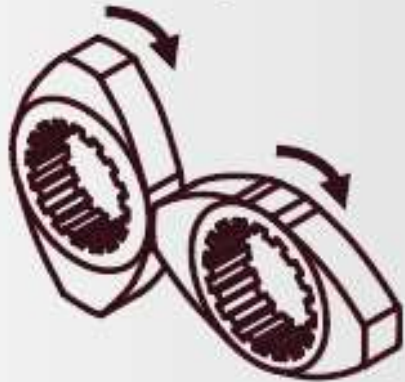
Monolobe
kneading disks



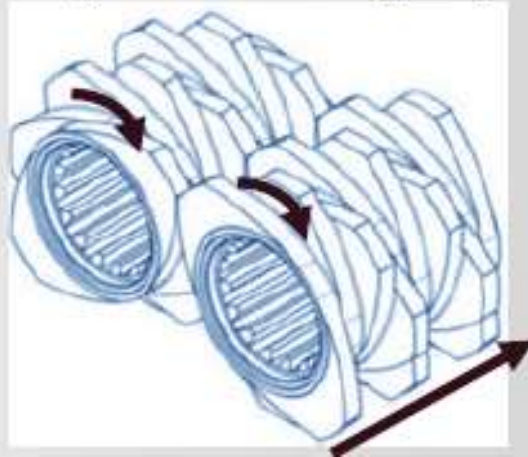
Monolobe kneading blocks,
right-handed



Bilobe
kneading disks



Bilobe kneading blocks,
right-handed 45° staggering



- Various pitches and lengths. Peripheral openings. Intense shearing. High material retention
- Used in melting and shearing sections (such as cooking, defibering, pressing, etc.)

- Intense shearing. High mixing capacity. Intermediate material retention
- Used in mixing and shearing sections (particularly with high viscosity materials)
- Generate elongational flows to improve dispersive mixing

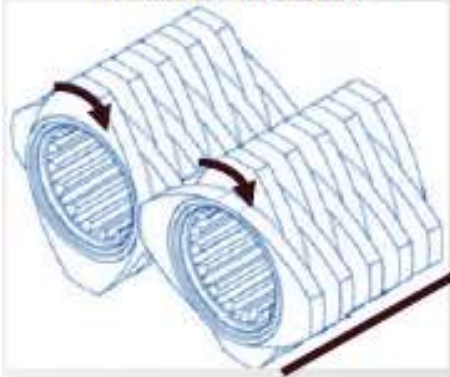
- Various disk thicknesses. Blocks with various lengths and staggering angles. Medium shearing and mixing. Intermediate material retention
- Used in melting, mixing and shearing sections

Elementos para un extrusor de doble husillo co-rotante

Type of screw elements or kneading blocks

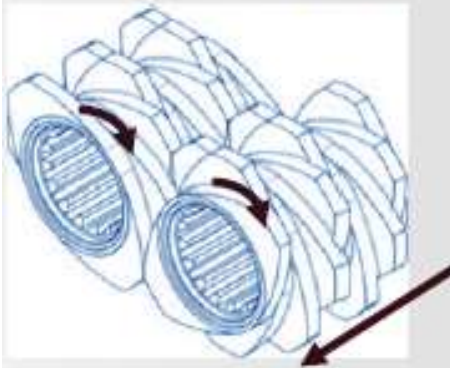
Main characteristics and process functions

Bilobe kneading blocks,
neutral 90° staggering



- Various disk thicknesses. Blocks with various lengths. Intense shearing and/or mixing. High material retention
- Used in melting, mixing (distributive and dispersive mixing) and shearing sections (cooking, reactive extrusion, etc.)

Bilobe kneading blocks,
left handed 45° staggering



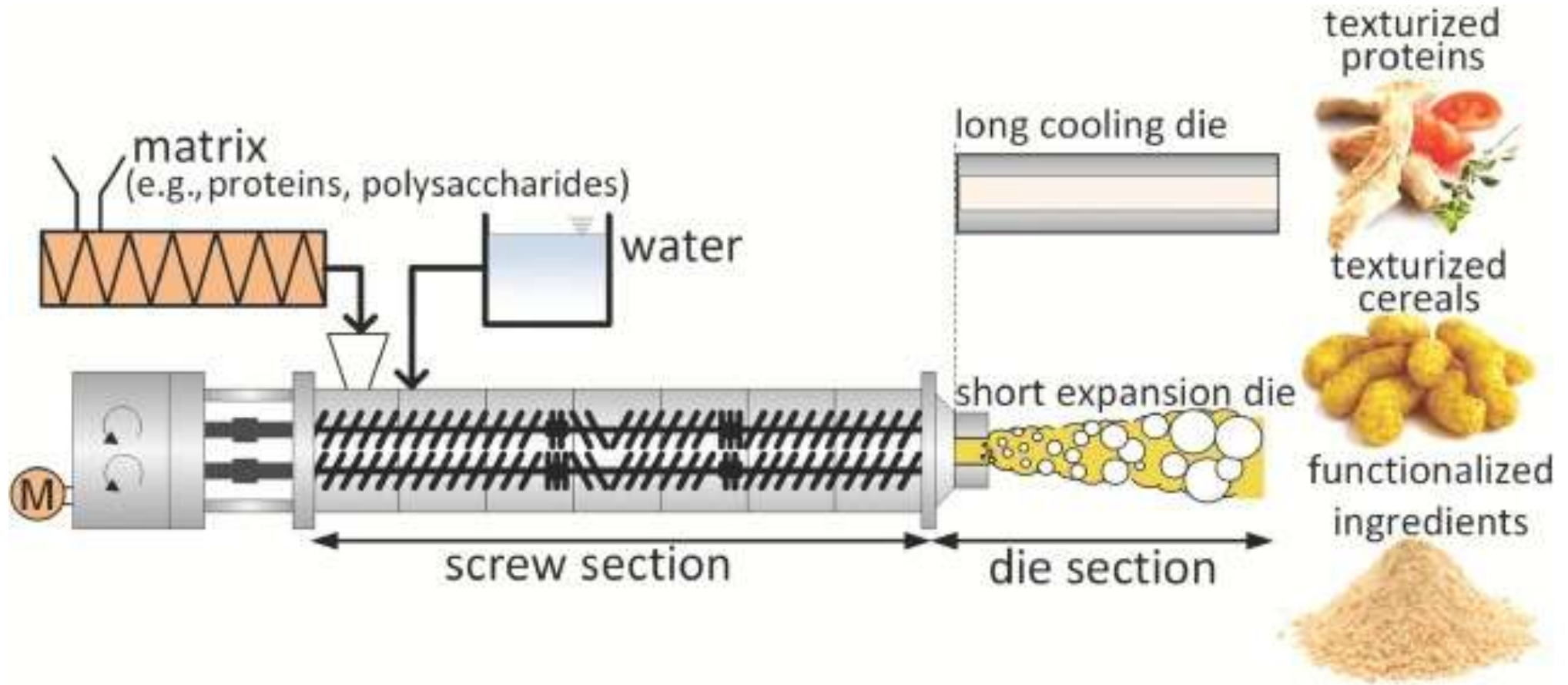
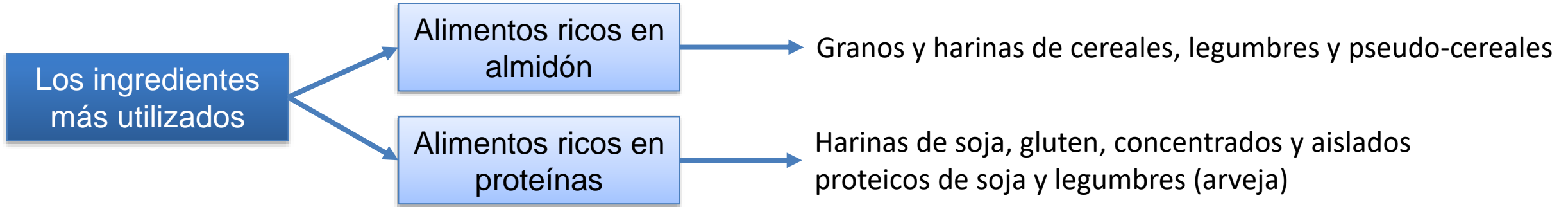
- Various disk thicknesses. Blocks with various lengths and staggering angles. Intense shearing and mixing. High material retention
- Used in melting, mixing and shearing sections
- Efficient to create a seal before a vacuum section

↻ : Direction of screw rotation

→ ↘ ↙ : Flow directions induced by screw elements or kneading blocks (positive, negative or neutral).

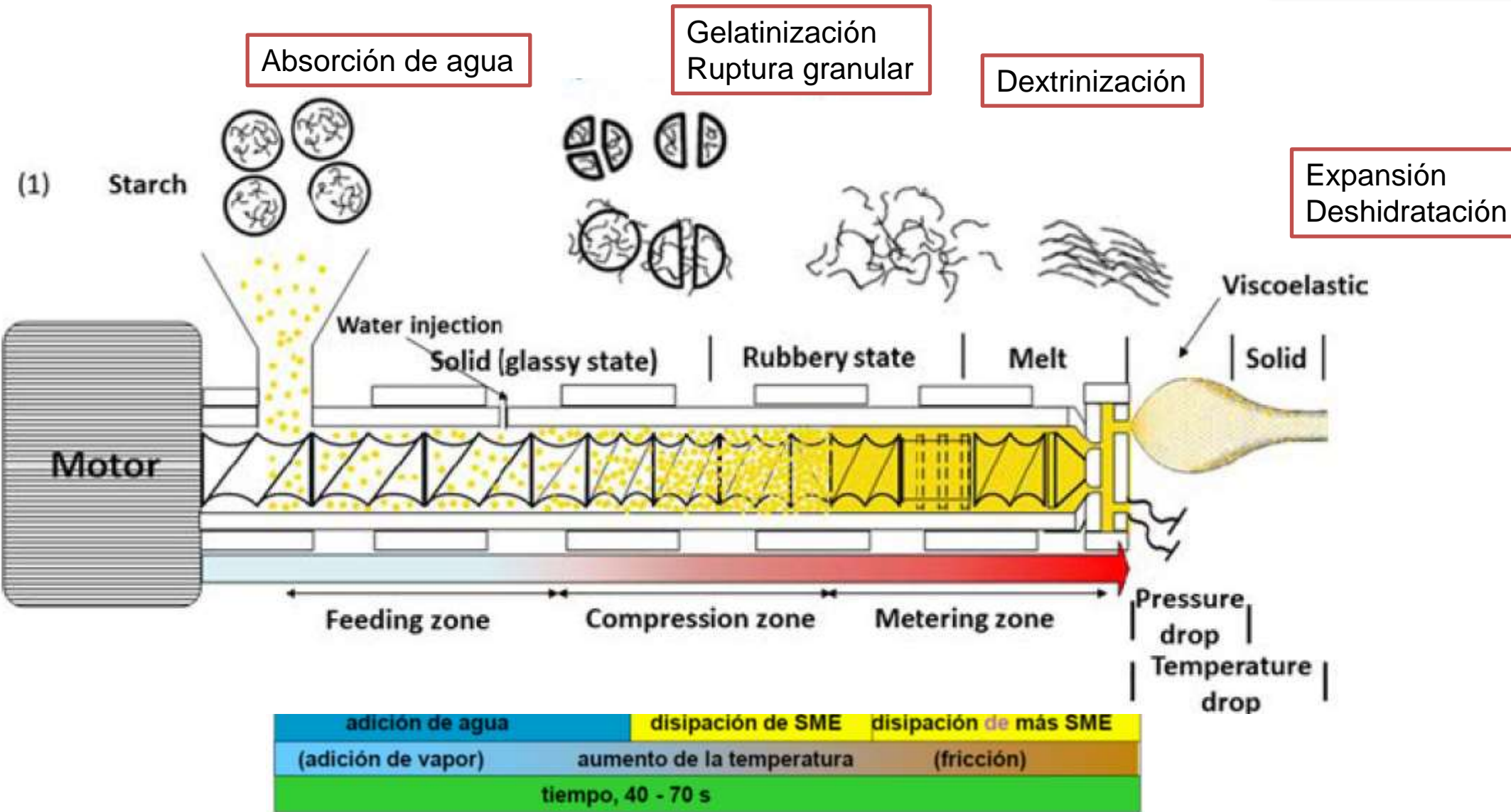
Source: Reproduced with permission of Clextral, France.

EXTRUSIÓN COCCIÓN (HTST)



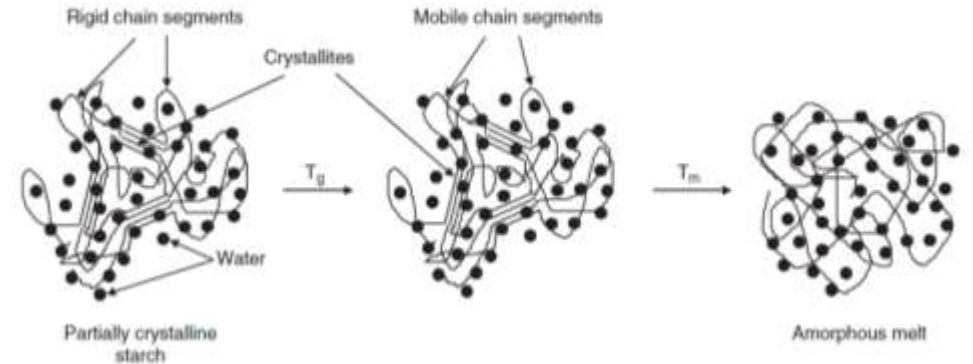
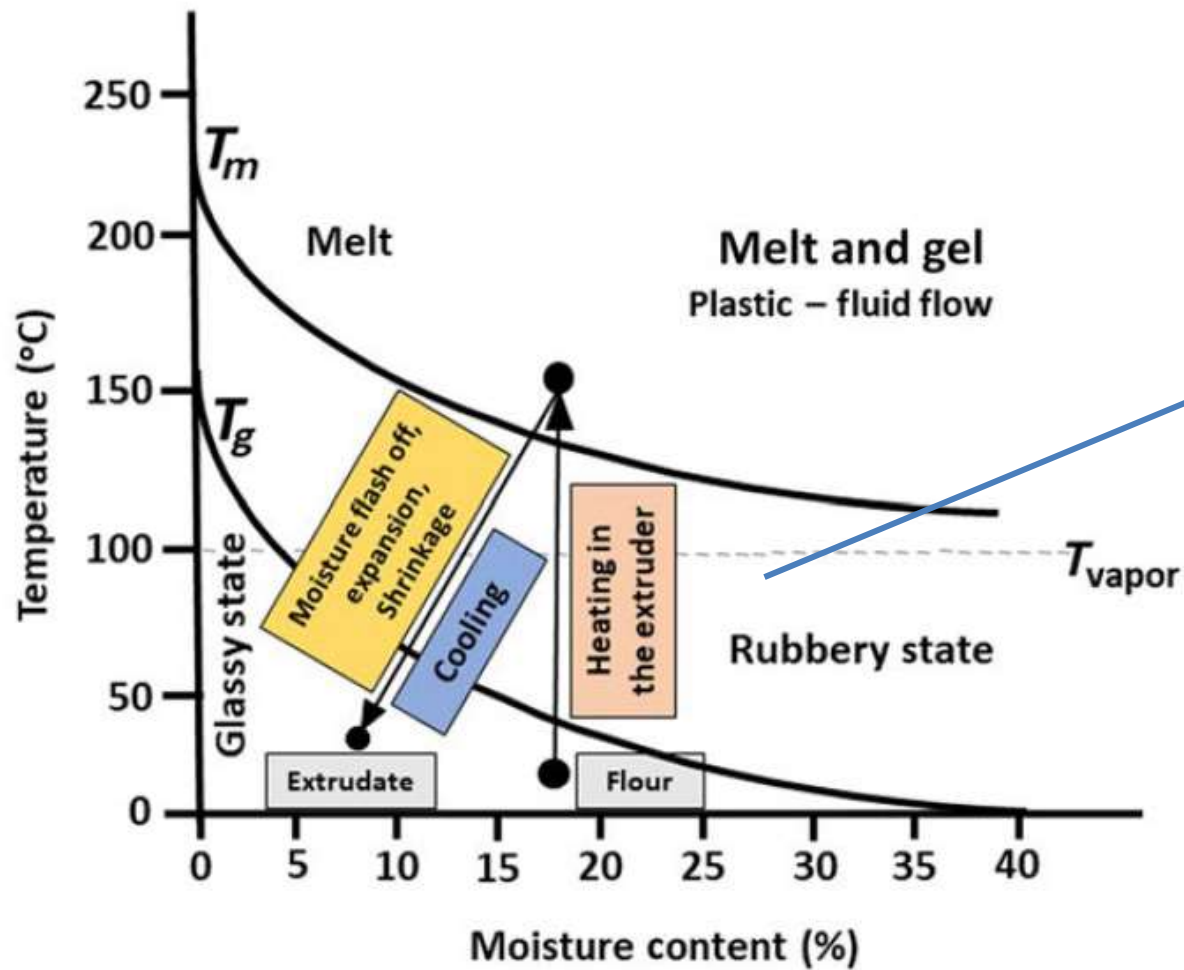
Principales componentes que se modifican en la extrusión y cómo se modifican

ALMIDÓN

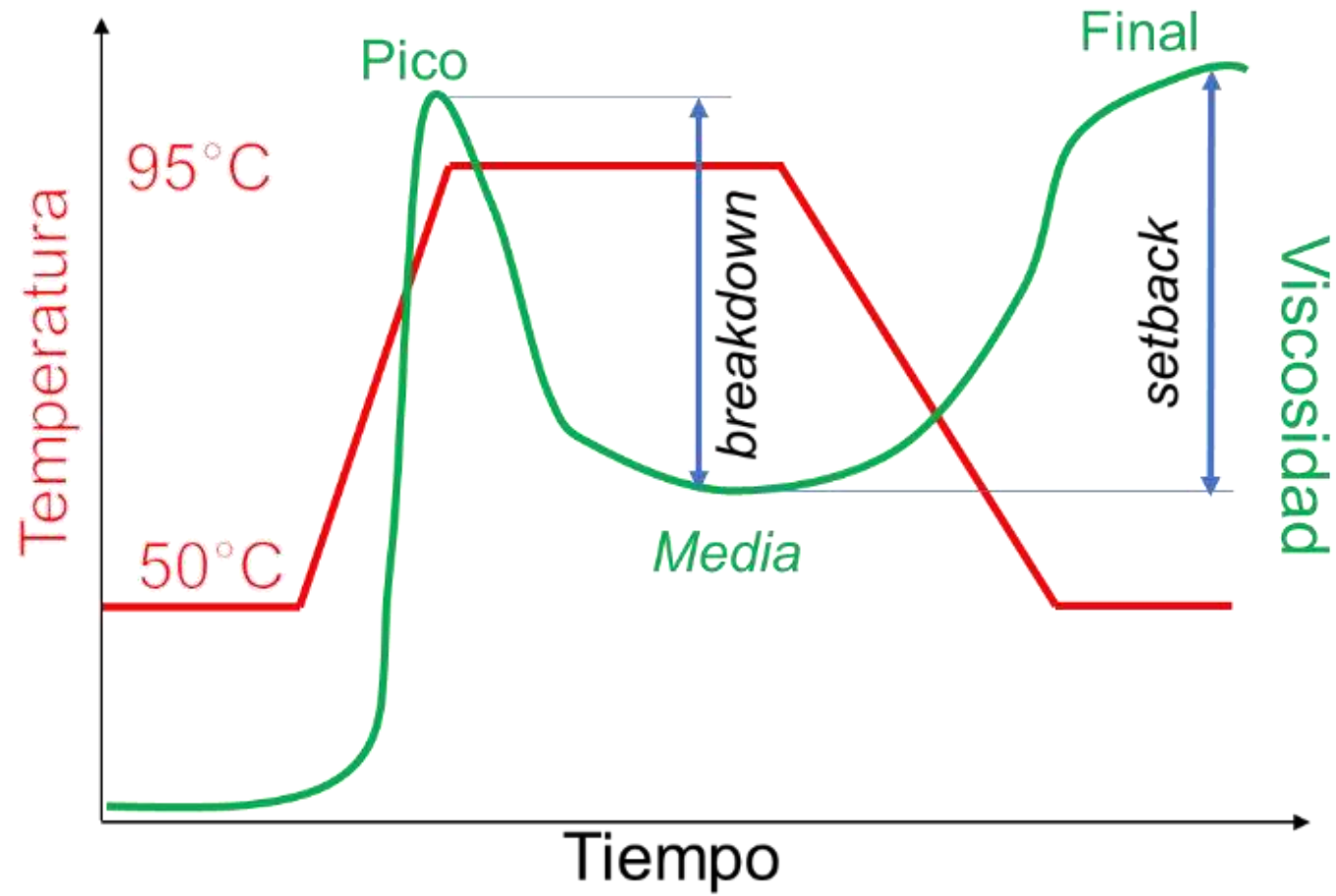


Fuerza mecánica intensa

Diagrama esquemático de la transformación de los almidones durante la extrusión



Perfil de viscosidad genérico de productos almidonosos.

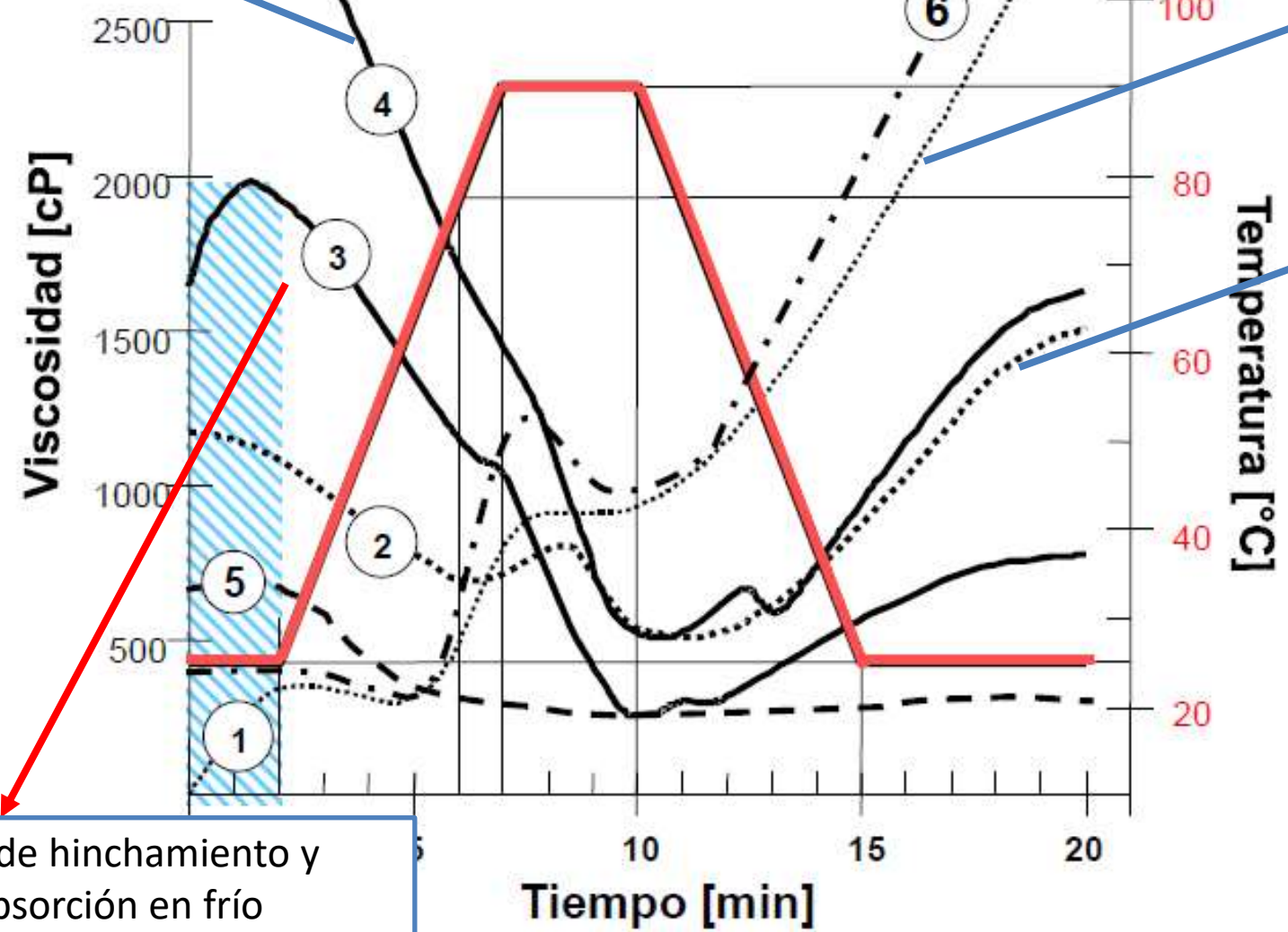


Distintas variaciones de SME y contenidos de agua

High-SME

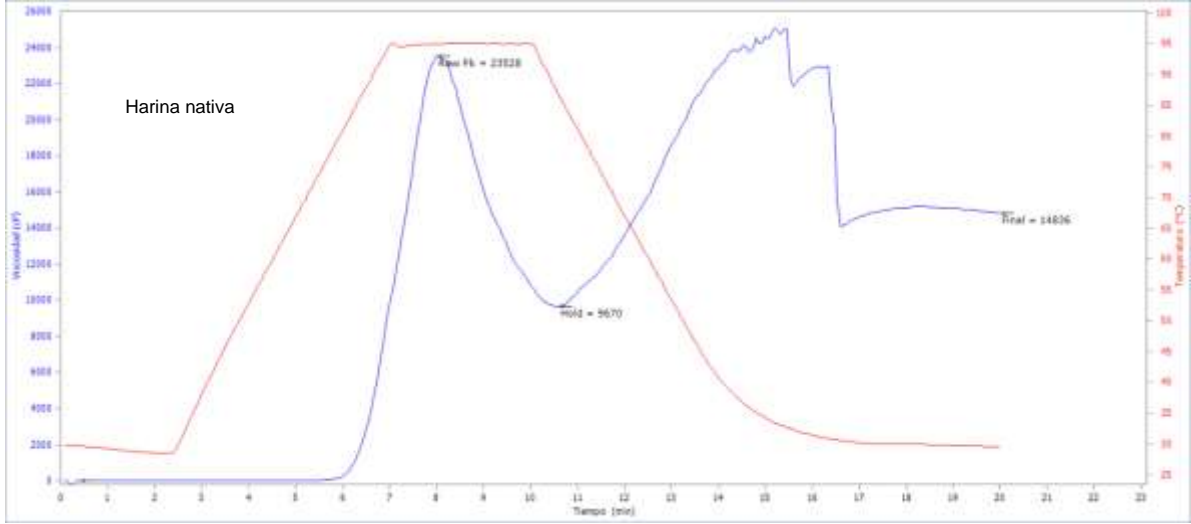
Nativa

low-SME



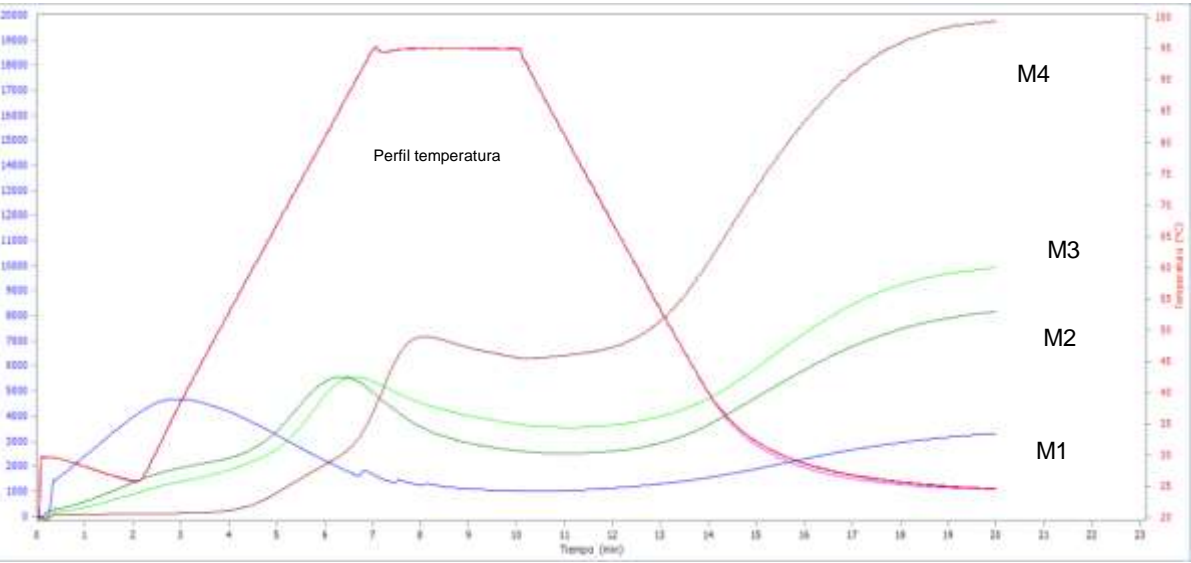
Pico de hinchamiento y absorción en frío

Extrusión de harina de arroz



Condiciones de extrusión:

- Alimentación
- **Agua en el extrusor**
- **Velocidad del tornillo**
- **Perfil de temperaturas del barril**
- Configuración/dimensiones de la boquilla

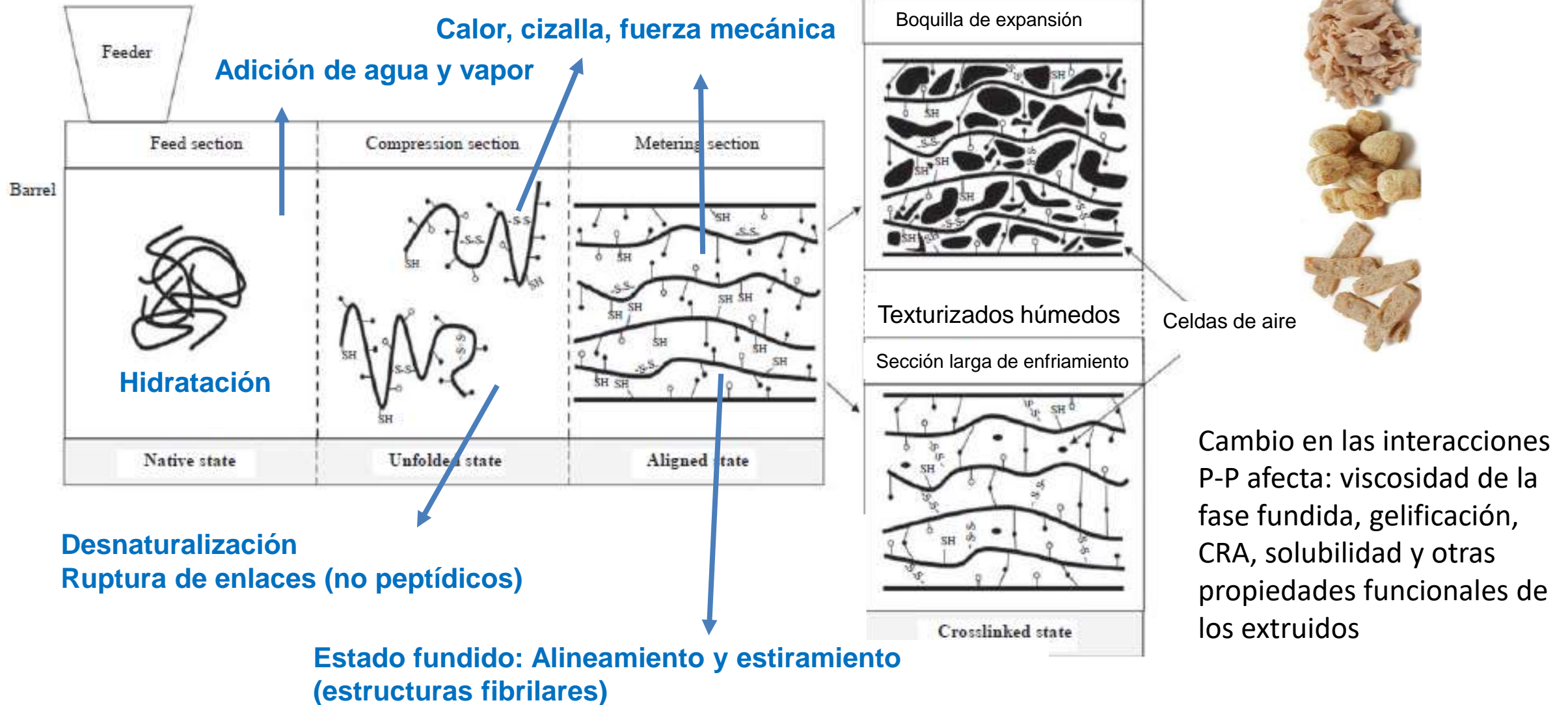


M1	Totalmente gelatinizada y alta solubilidad en frio
M2	Totalmente gelatinizada y baja solubilidad en frio
M3	Totalmente gelatinizada y baja solubilidad en frio
M4	Parcialmente gelatinizada y muy baja solubilidad en frio

Principales componentes que se modifican en la extrusión y cómo se modifican

Proteínas

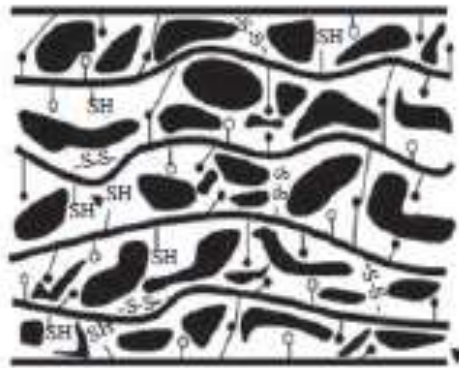
Enfriamiento Entrecruzamiento /Seteado



Proteínas

Texturizados SECOS

Boquilla de expansión



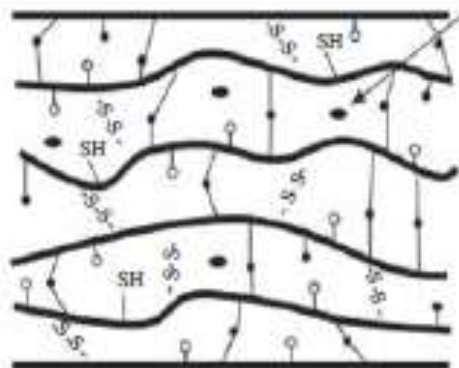
Texturizados secos

- sale de la extrusora a 22-35% de humedad
- con textura fibroso y esponjoso
- Debe secarse para almacenar
- Debe ser rehidratado antes de su uso
- Uso domestico y para la industria carnicería



Texturizados húmedos

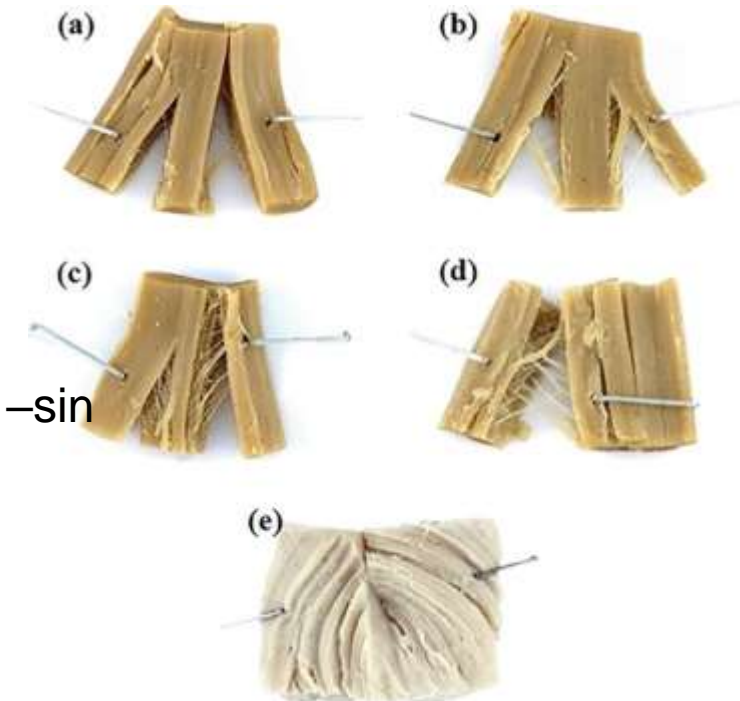
Sección larga de enfriamiento



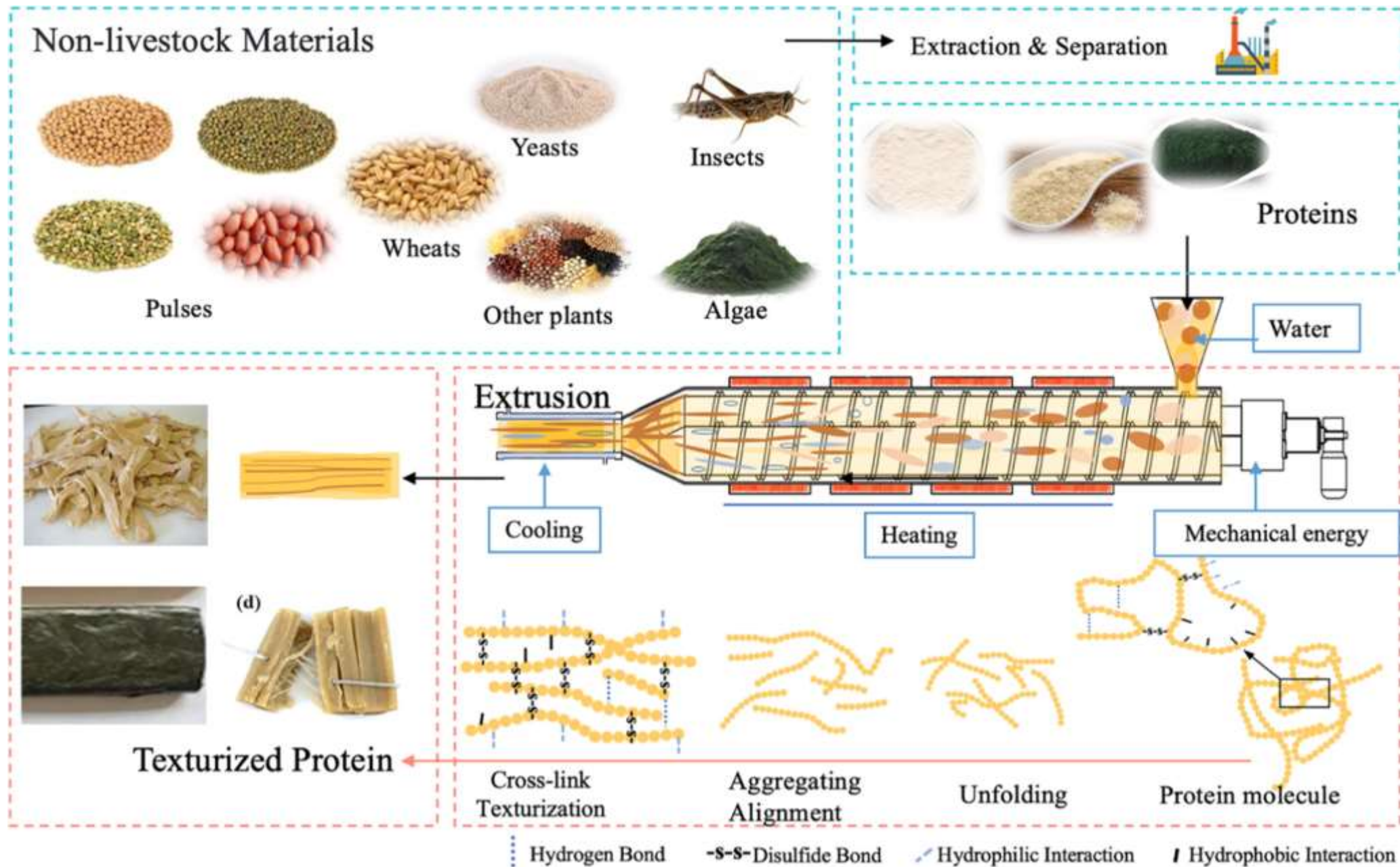
Air cell

Texturizados húmedos

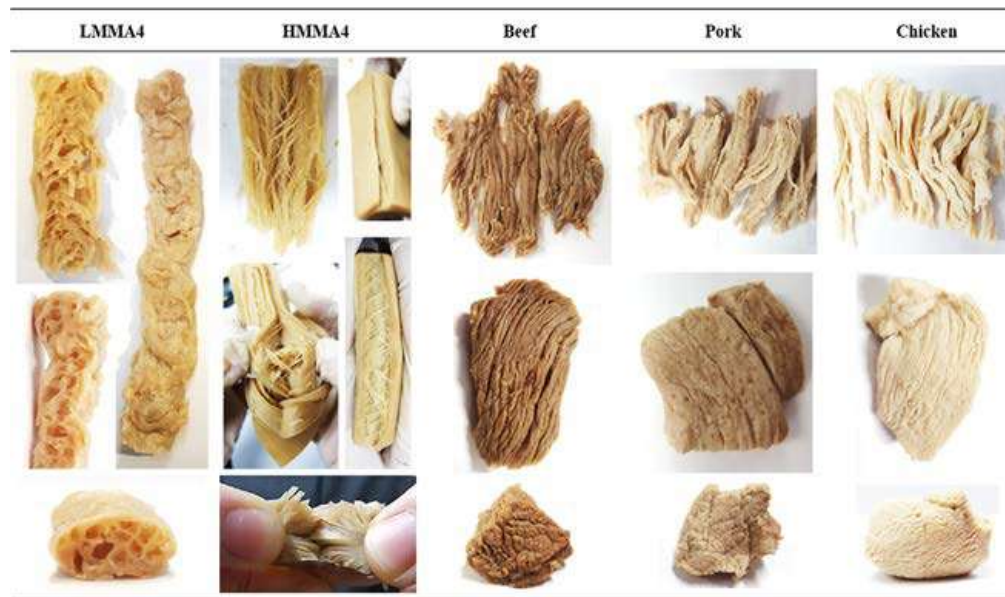
- sale de la extrusora a 50-60%de humedad
- textura fibroso, carnososo, sin expansión
- productos ya listo para su posterior procesamiento –sin secar
- Alimentos humanos y mascotas.



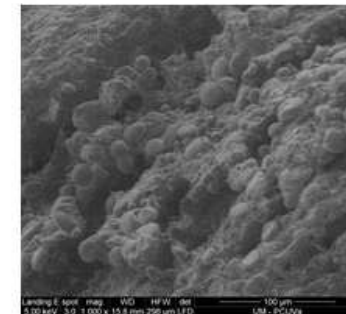
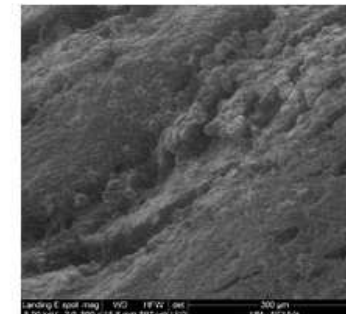
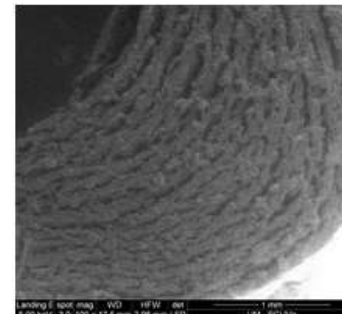
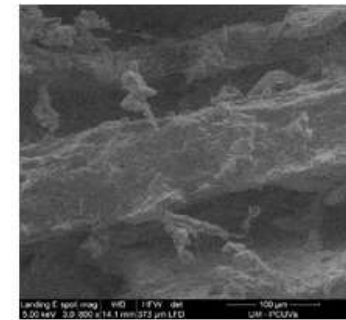
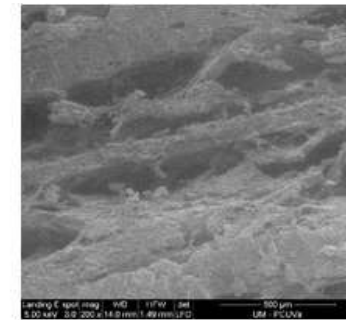
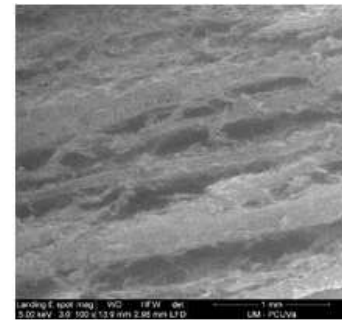
Crosslinked state



Texturizados húmedos

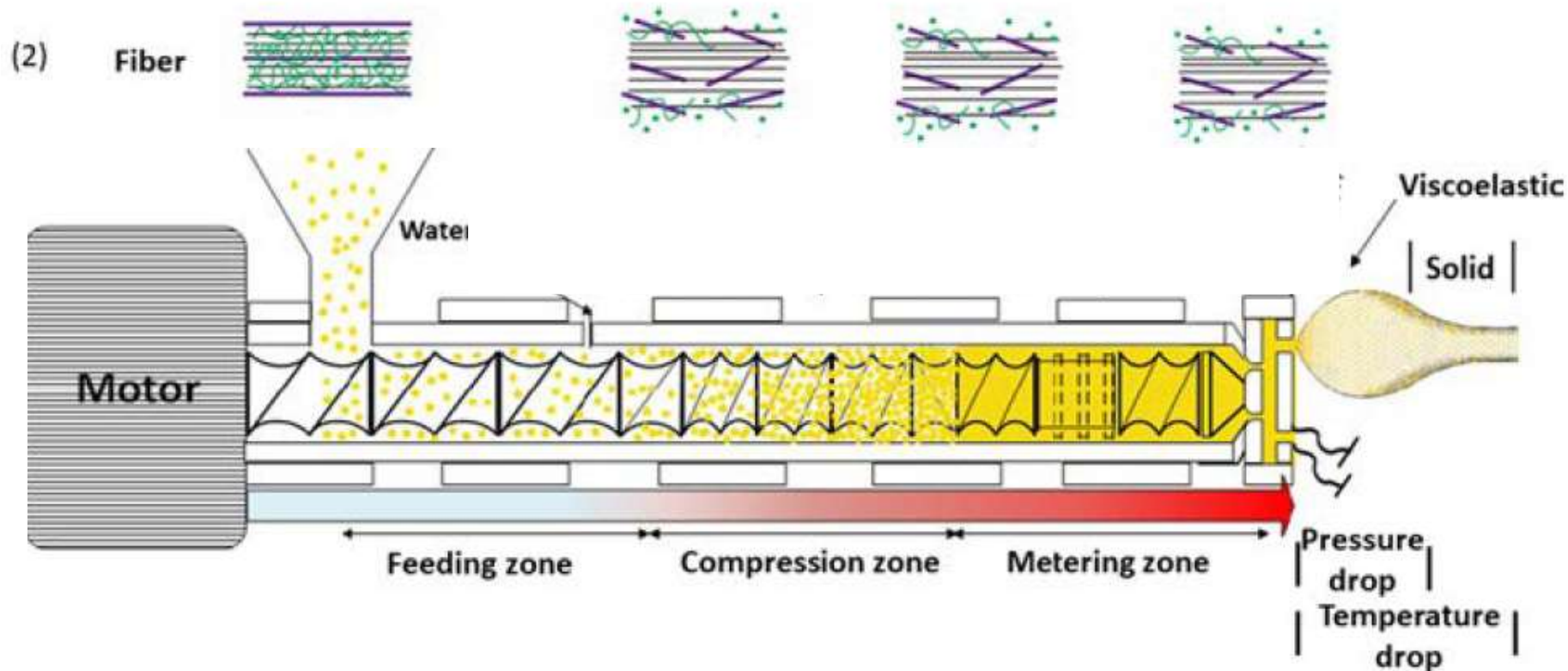


Detalles de proteína de guisante texturizada en húmedo liofilizada



FIBRAS

Fibras insolubles (sin cambio de fase) pueden alterarse y fragmentarse: algunos enlaces supramoleculares pueden romperse con el calor y el cizallamiento



Altas temperaturas, presiones y cizalla pueden romper parte de los enlaces glucosídicos: liberando oligosacáridos

- Disminución del grado de cristalinidad
- Aumento de las regiones amorfas y flexibilidad
- Textura más suave en productos ricos en fibra

- Mayor digestibilidad de la fibra en animales
- Aumento de fibra soluble en detrimento de insoluble
- Mayor absorción de agua

Efecto sobre los alimentos

Características organolépticas

Producción de **formas y texturas características**: extensión de modificaciones sobre el almidón y proteínas (condiciones funcionamiento) produce una amplia gama de texturas y densidades.

Las condiciones de **HTST** tienen efectos menores sobre el **color y el sabor natural de los alimentos** (y pigmentos añadidos).

Cambios en el **color** debido a la expansión del producto, calor excesivo o reacciones con proteínas, azúcares reductores o iones metálicos puede ser un problema en algunos alimentos extruidos.



Co-extrusión



Proteínas texturizadas
(meat extenders)

Valor nutricional

Pérdidas vitaminas: tipo de alimento, humedad, temperatura y tiempo de retención.

Pérdidas son mínimas en la extrusión en frío.

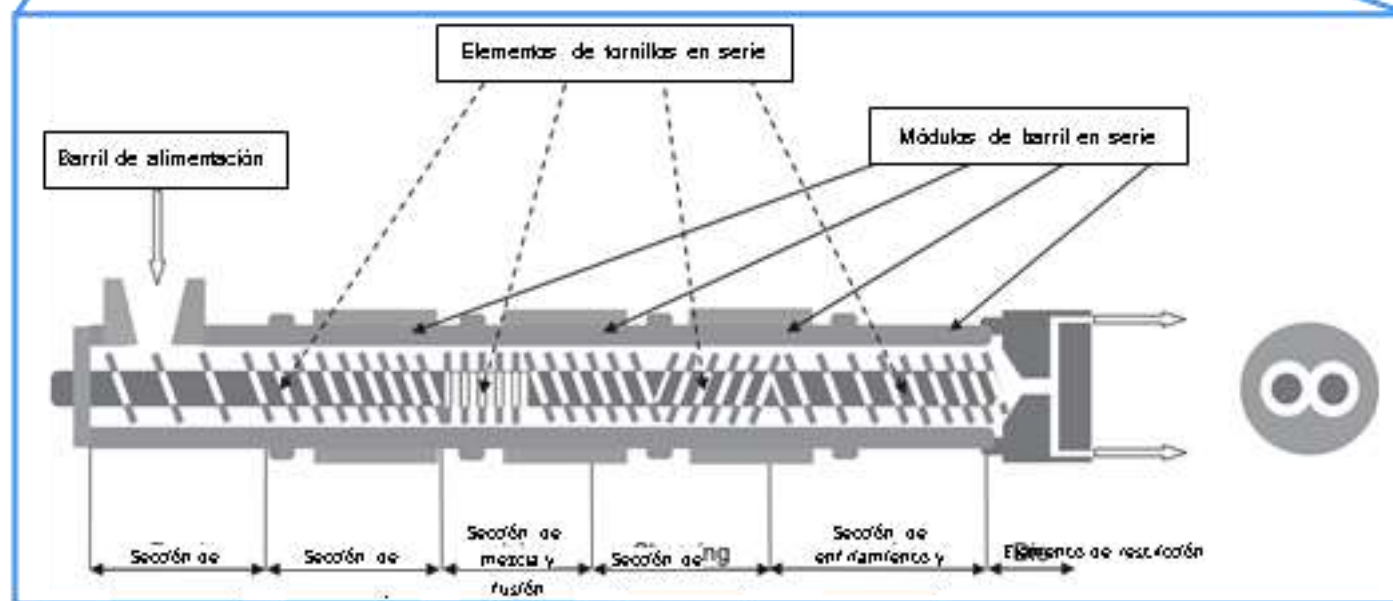
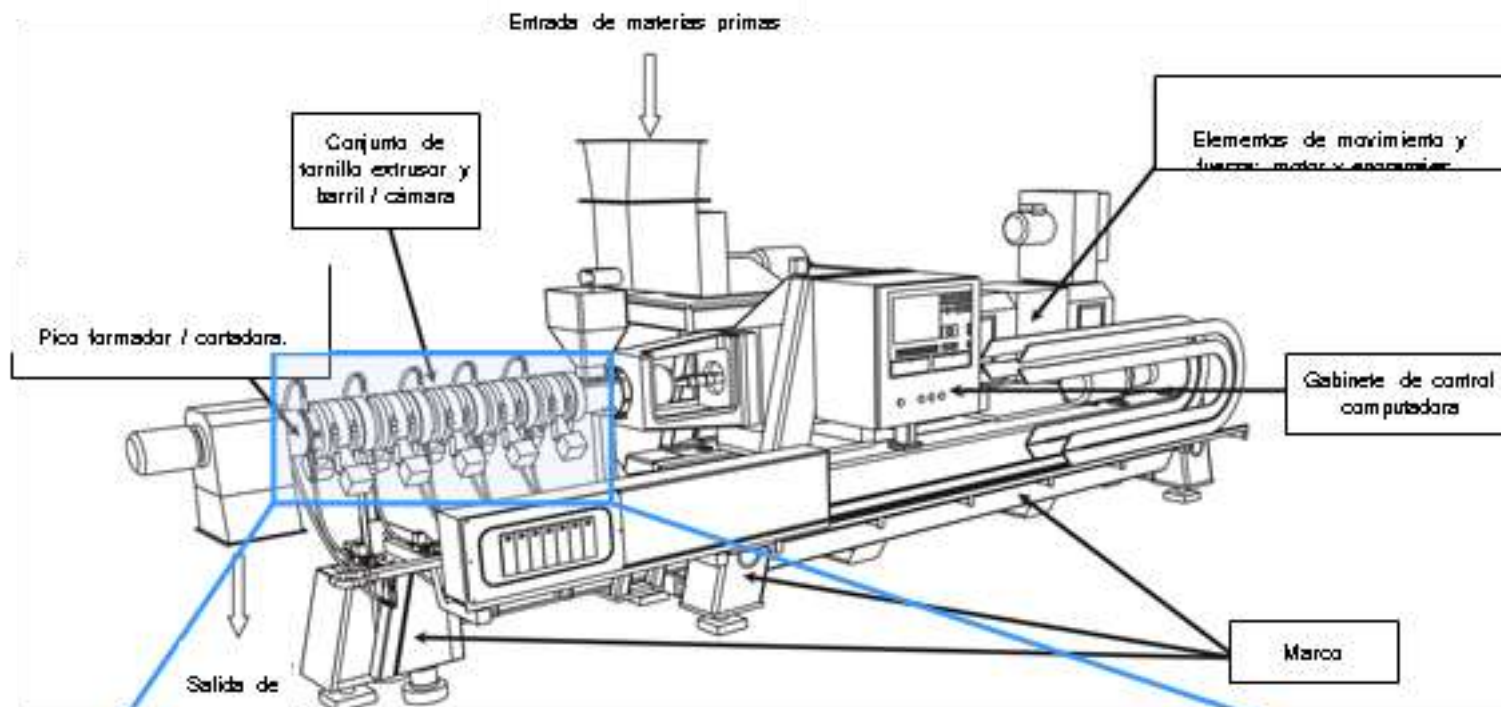
Las **condiciones HTST** en la cocción por extrusión, y el rápido enfriamiento como el producto emerge de la boquilla, causan pérdidas relativamente pequeñas de la mayoría de vitaminas y aminoácidos esenciales.

Bajas pérdidas de tiamina, riboflavina, piridoxina, niacina o ácido fólico en cereales.

Pérdidas mayores en **ácido ascórbico, carotenos, lisina y metionina**.

Las altas temperaturas y la presencia de azúcares causan **Maillard y reducción en la calidad de la proteína**.

Destrucción de componentes antinutricionales, mejora el valor nutritivo de las proteínas vegetales texturizados.



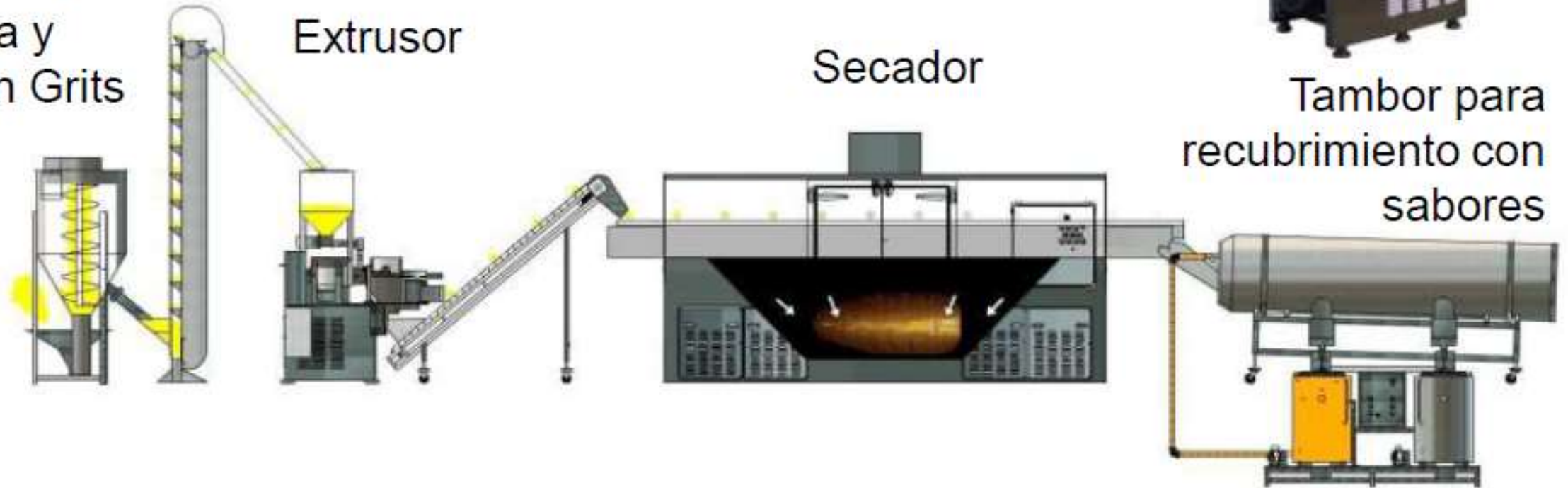
Línea de extrusión de productos expandidos (harinas ricas en almidón)

Mezclador,
adición de
agua y
Corn Grits

Extrusor

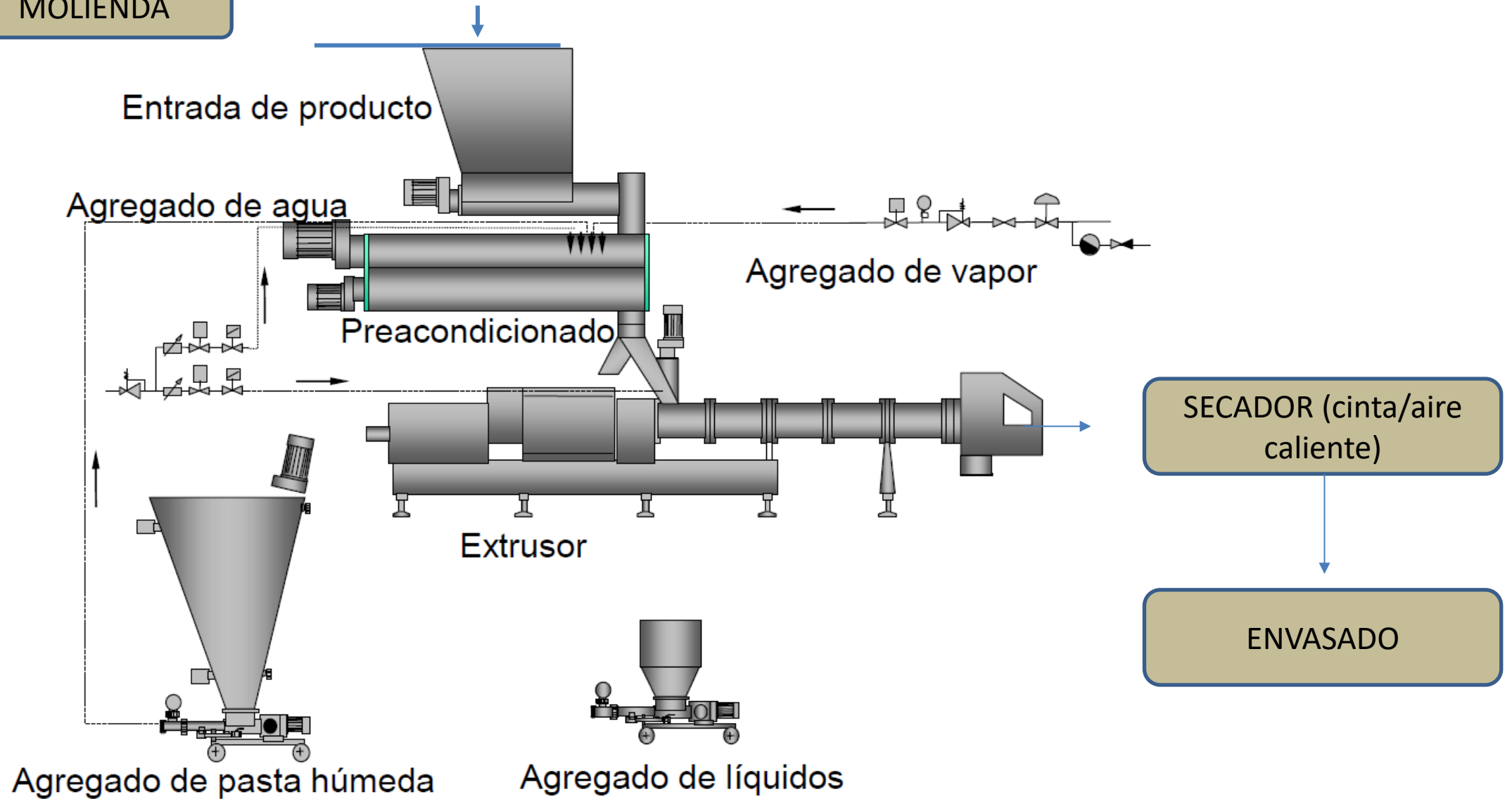
Secador

Tambor para
recubrimiento con
sabores



Línea de extrusión de proteínas secas

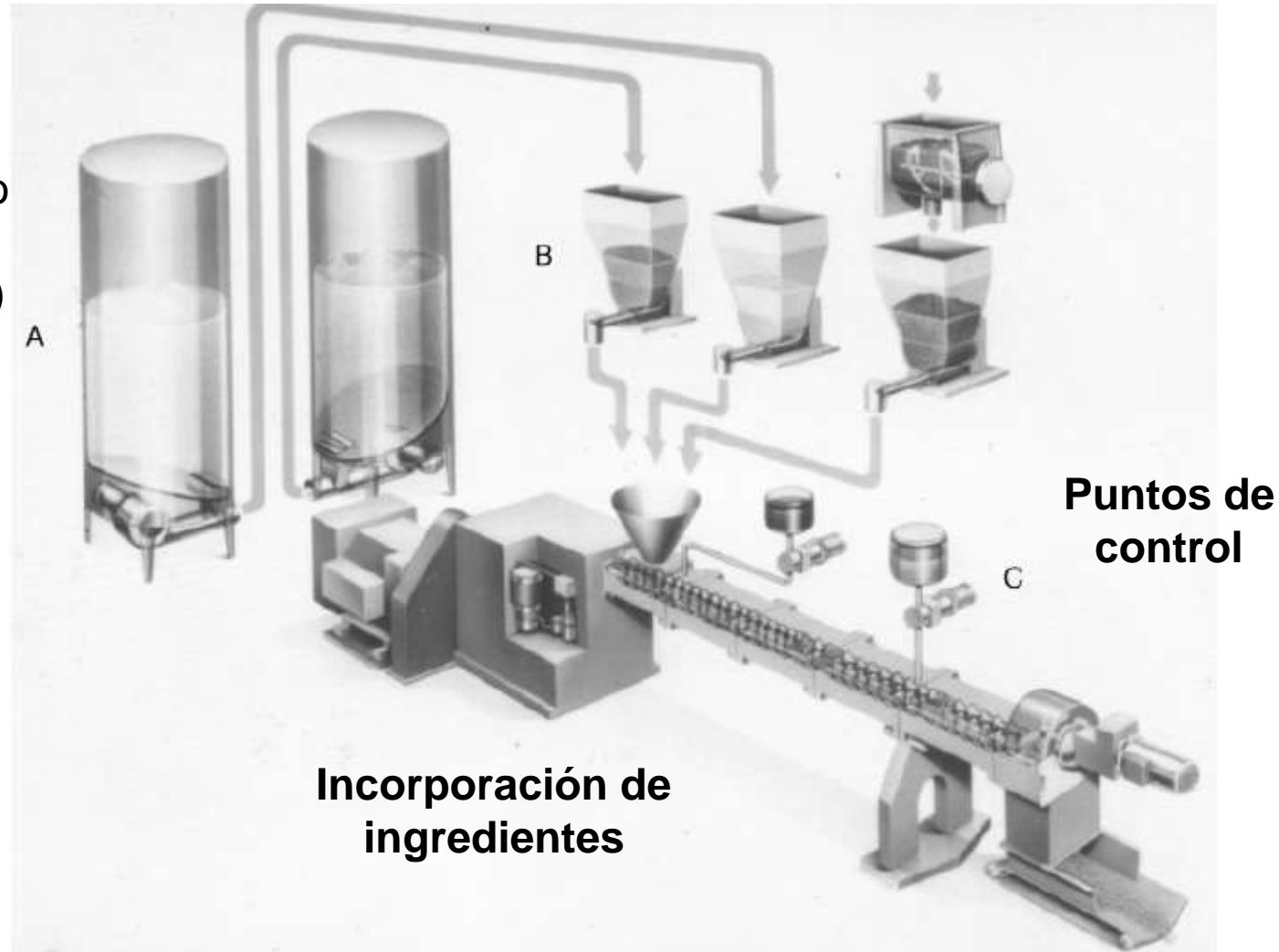
MOLIENDA



Equipos auxiliares

Acondicionamiento:
humectación (agua-vapor, tiempo de residencia), temperatura (gelatinización/desnaturalización)

Tolvas de alimentación



Operaciones pos-extrusión: cordado, secado, frito, adición de ingredientes aromatizantes, etc.

Bibliografía

INTRODUCTION TO FOOD ENGINEERING. 2009. 4th Edition Singh P, Heldman D. Academic Press

Extrusion Processing Technology. Food and Non-Food Biomaterials
Jean-Marie Bouvier y Osvaldo H. Campanella, John Wiley & Sons, Ltd. 2014.

Extrusion Cooking_ Cereal Grains Processing-Woodhead Publishing and AACCC International Press. 2020
Elsevier Inc.