

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA**

*EXTRUSIÓN DE POLÍMEROS NATURALES:
CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA MEZCLAS DE
HARINA DE TRIGO EN EXTRUSORES DE TORNILLO
SIMPLE*

TESIS
PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA

(INGENIERÍA QUÍMICA, ALIMENTOS)

P R E S E N T A

I.Q. ROSA MARÍA ELENA ARIAS GARCÍA

TUTORA: DRA. EN ING. MARÍA DEL CARMEN DURÁN
DOMÍNGUEZ DE BAZÚA





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dra. Ruth Pedroza Islas
PRIMER VOCAL: Dr. Alfredo Salazar Zazueta
SECRETARIO: Dr. Ángel E. Chávez Castellanos
PRIMER SUPLENTE: M. en C. Josefina Morales de León
SEGUNDO SUPLENTE: Dr. Rafael Herrera Nájera

Lugar donde se desarrolló la tesis:

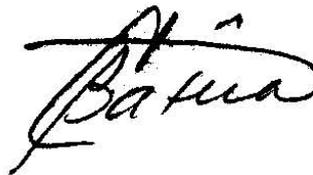
Laboratorio de Tecnología de Alimentos
Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán

Departamento de Alimentos y Biotecnología
Facultad de Química, UNAM

Pastas y Pellets de México S.A. de C.V.

DIRECTOR DE TESIS

Dra.-Ing. María del Carmen Durán de
Bazúa



SUSTENTANTE

Ing. Rosa María Elena Arias García





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

VOTO APROBATORIO

BIOL. FRANCISCO J. INCERA UGALDE
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN DEL POSGRADO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
P R E S E N T E

Me permito informarle que, después de haber leído la tesis intitulada

“EXTRUSIÓN DE POLÍMEROS NATURALES: CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA MEZCLAS DE HARINA DE TRIGO EN EXTRUSORES DE TORNILLO SIMPLE”,

presentada por la Ing. Quím. ROSA MARÍA ELENA ARIAS GARCÍA, con número de cuenta 94801699 en el campo del conocimiento de Ingeniería Química del programa antecedente (Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas, Maestría en Ciencia de los Alimentos, Ingeniería de Alimentos), considero que cumple con los requisitos para obtener el grado de MAESTRA EN INGENIERÍA, por lo que le otorgo mi voto. Esto le permitirá que proceda con los trámites académico-administrativos. Quedo enterado(a) de que formaré parte del jurado en la fecha y hora en que se me cite posteriormente.

Atentamente,
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Ciudad Universitaria, D.F.

	FIRMA	FECHA	SÍ	NO
Presidente: Dra. Ruth Pedroza Islas		5/14/06	✓	___
Vocal: Dr. Alfredo Salazar Zazueta		30/5/06	✓	___
Secretario: Dr. Ángel Enrique Chávez Castellanos		24/Mayo/06	✓	___
Primer Suplente: M. en C. Josefina Morales de León		02/05/06	✓	___
Segundo Suplente: Dr. Rafael Herrera Nájera		24/May/06	✓	___

c.c.p. Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa, Tutora principal
c.c.p. SACC de Ingeniería Química
c.c.p. IQ Rosa María Elena Arias García, Interesado(a)

FE

Es la plena certeza de que lo que esperamos ha de llegar

*Es el convencimiento absoluto de que hemos de alcanzar lo que
ni siquiera vislumbramos*

Hebreos 11,1

DIOS, SEÑOR MÍO, INFINITAS GRACIAS TE DOY POR TU AMOR Y POR ESTA VIDA Y PREGUNTO COMO EL POETA: ¿SEÑOR, QUÉ TENGO YO QUE MI AMISTAD PROCURAS . . . ?

A MI MEJOR AMIGO, JESÚS, QUE TU AMOR Y TU GUÍA NUNCA ME FALTEN. JAMÁS DEJES DE ILUMINAR MI CAMINO

A MI MAMÁ, DÑA. ROSAURA GARCÍA DE LA VEGA POR TU INMENSO CARÍÑO, DEDICACIÓN Y POR EL APOYO INCONDICIONAL QUE SIEMPRE ME HAS DADO. SI ALGO HE LOGRADO, ES POR TÍ

A MI PAPÁ, DN. CARLOS ARIAS OSORIO, EN RECUERDO TUYO CON TODO MI CARÍÑO. PORQUE TU AMOR Y PRESENCIA SIEMPRE ME ACOMPAÑAN. YO SÉ QUE DESDE EL CIELO HAS DE SENTIRTE ORGULLOSO Y FELIZ.

A MIS HERMANOS, MARGA Y PEPE, PORQUE YO SÉ QUE SIEMPRE CUENTO CON SU APOYO Y CARÍÑO

A MI ESPOSO, GREGORIO. EL HABERME ENCONTRADO CON UN COMPAÑERO COMO TÚ HA SIDO UN PRIVILEGIO INMENSO Y UNA DEUDA INFINITA QUE TENGO CON DIOS

A MIS HIJOS, TOÑO, NANDO Y MARIANITA, QUE REPRESENTAN EL REGALO Y TESORO MÁS PRECIADOS QUE DIOS ME HA DADO Y EL MAYOR Y MEJOR DESAFÍO QUE DEBO CUMPLIR EN ESTA VIDA

A MI SOBRINA ANA, QUE ES PARA MÍ UNA HIJA Y UNA LUZ ESPECIAL

A LA DRA. CARMEN DURÁN, QUIEN CON SU GRAN DON DE MAESTRA ME ENSEÑÓ NO SÓLO INGENIERÍA , SINO ALGO MÁS VALIOSO COMO EL CREER EN MÍ MISMA. GRACIAS MIL, PORQUE ES UNA DE LAS POCAS PERSONAS QUE PUEDEN SER BRILLANTES Y DESTACADAS PERO A LA VEZ SENCILLAS Y MUY HUMANAS

A TODOS ESOS PEQUEÑOS, PERO GRANDES SERES QUE SIEMPRE ME HAN ACOMPAÑADO Y AMADO INCONDICIONALMENTE EN MI CAMINO POR ESTE MUNDO

Reconocimientos

Agradezco a los Dres. Ruth Pedroza, Alfredo Salazar, Ángel Chávez, Josefina Morales de León y Rafael Herrera Nájera por su valiosa revisión del presente documento, así como su apoyo académico, el cual es grandemente reconocido.

Asimismo, al Laboratorio de Tecnología de Alimentos del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán por facilitar el uso de sus instalaciones y equipo, con un agradecimiento especial a la Dra. Josefina Morales y a Gloria Acevedo por todo el apoyo brindado.

También al Laboratorio de Tecnologías más Limpias del Departamento de Alimentos y Biotecnología, de la Facultad de Química, por el apoyo en la realización de análisis químicos y la operación del texturómetro Brabender.

A la guía invaluable del Ing. Gregorio Pérez Palacios Henaine por sus enseñanzas en el campo de la industria. Sus conocimientos, experiencia y paciencia deben tener un reconocimiento especial.

Al apoyo del personal de la empresa italiana Pavan por sus valiosas aportaciones y enseñanzas.

Al M. en C. Salvador Sánchez Tovar por su apoyo en el análisis estadístico de este trabajo.

A los estudiantes de licenciatura, Roberto Pérez Ramírez, Olga Vélez Medina y Selene Tapia Peralta que me apoyaron en este esfuerzo.

Al personal de Pastas y Pellets de México, en especial a Pedro Luna, que gracias a su apoyo y sus enseñanzas, me han hecho más fácil el entendimiento de la difícil tarea que es una industria.

Merece un reconocimiento aparte y muy especial la Dra. Carmen Durán de Bazúa por su guía, sus enseñanzas y su inmenso apoyo que nunca me faltó.

Índice

	Pág.
Resumen	10
Abstract	11
Glosario	12
Capítulo 1. Introducción	16
1.1. Problemática	17
1.2. Objetivos	18
Capítulo 2. Antecedentes	20
2.1. El trigo	20
2.1.1. Fisiología	20
2.1.2. Aporte nutricional	24
2.2. Propiedades funcionales	25
2.2.1. Almidón	25
2.2.2. Proteínas	28
2.2.3. Clasificación	30
2.3. Harinas. Calidad industrial y obtención	33
2.4. Las botanas	36
2.4.1. Cronología	36
2.4.2. Clasificación	37
2.5. Funcionalidad de los ingredientes	39
2.6. Proceso de elaboración	48
2.6.1. Amasado	48
2.6.2. Extrusión de alimentos	49
2.6.2.1. Clasificación de los extrusores	51
2.6.2.2. Tipos específicos de extrusores	52
2.6.2.3. La texturización de los alimentos en la extrusión	53
2.6.2.4. Ventajas de la cocción por extrusión	56
2.6.3. Tecnología de secado en botanas de tercera generación	58
2.6.3.1. Secado por aire caliente	58
2.6.3.2. Períodos de velocidad de secado	59
2.6.3.3. Contenido crítico de humedad	61
2.6.3.4. Contenido de humedad en equilibrio	63
2.6.3.5. Secado de alimentos extrudidos tipo “pellets” para botana	63

	Pág.
2.6.3.6. Tipo de secadores en la elaboración de botanas extrudidas	67
2.6.4. La fritura de botanas extrudidas	69
2.6.4.1. Comportamiento de los aceites de fritura	69
2.6.4.2. Comportamiento del alimento en la fritura	73
2.6.4.3. Cambios químicos y físicos	74
2.6.4.4. Medidas de control	74
Capítulo 3. Materiales y métodos	76
3.1. Estudio a nivel de laboratorio	76
3.1.1. Materiales y condiciones de extrusión	76
3.1.2. Metodología	77
3.1.2.1. Clasificación de las harinas e identificación de los productos	77
3.1.2.2. Calidad panadera y análisis proximal de las harinas y los productos extrudidos	78
3.1.2.3. Pruebas fisicoquímicas y de textura para productos extrudidos	79
3.1.2.4. Evaluación sensorial	82
3.1.2.4.1. Evaluación preliminar de los productos extrudidos	83
3.1.2.4.2. Evaluación sensorial con consumidores	85
3.2. Aplicación del proyecto en la industria	86
3.2.1. Metodología de selección y seguimiento de la supervisión del montaje y arranque de una planta industrial de extrusión	86
3.2.1.1. Selección	86
3.2.1.2. Montaje	87
3.2.1.3. Arranque	87
Capítulo 4. Resultados y discusión	89
4.1. Análisis proximal de las harinas	89
4.2. Pruebas fisicoquímicas	89
4.3. Comparación por variaciones de almidón en la formulación	91
4.4. Evaluación sensorial	94
4.5. Análisis estadísticos	96
4.6. Evaluación sensorial	104

	Pág.
Capítulo 5. Selección, supervisión de la construcción y arranque de una planta de extrusión	108
5.1. Extrusores cocedores para la producción de alimentos con almidón	109
5.2. Aspectos especiales a considerar de la extrusión	111
5.2.1. Formado	111
5.2.2. La transformación de ingredientes	113
5.3. Instalación de una planta de extrusión	114
5.3.1. Diagrama de flujo	114
5.3.2. Servicios y equipos auxiliares	115
5.3.3. Descripción de los equipos	125
5.3.3.1. Transferencia de cantidad de movimiento	125
a) Bombas	125
b) Compresores	126
c) Mezcladores	127
5.3.3.2. Transferencia de calor	127
a) Caldera	127
b) Intercambiadores de calor	128
5.3.3.3. Transferencia simultánea de momento, calor y masa	130
a) Extrusores	130
b) Secadores	131
5.3.3.4. Otros equipos	133
a) Transportadores	133
a.1) Transportador de tornillo sinfín	133
a.2) Transportador de banda	134
a.3) Transportador neumático	134
5.4. Arranque de una planta de extrusión	135
5.5. Discusión final	138
5.5.1. Experimentos de laboratorio	138
5.5.2. Industria	142
Capítulo 6. Conclusiones	145
6.1. Experimentos a escala de laboratorio	145
6.2. Industria de botanas obtenidas por extrusión	146

Apéndices	Pág.
Apéndice A. Técnicas para el análisis proximal	147
A.1. Determinación de humedad	148
A.2. Determinación de cenizas	148
A.3. Determinación de proteína cruda	148
A.4. Determinación de extracto etéreo	150
A.5. Determinación de fibra cruda	150
A.6. Determinación de carbohidratos asimilables	151
Apéndice B. Especificaciones de las harinas	152
Apéndice C. Datos experimentales de las pruebas fisicoquímicas	156
Apéndice D. Relación de diferentes variables de extrusión	161
Apéndice E. Ecuaciones de secado	175
Bibliografía	182

Índice de tablas

Tabla	Pág.
2.1. Composición del salvado	22
2.2. Composición del endospermo	23
2.3. Clasificación del trigo	31
2.4. Clasificación del trigo en función de su calidad panadera	32
2.5. Distribución de botanas en el mundo	39
2.6. Distribución de botanas de acuerdo a la tecnología de los procesos	40
2.7. Consideraciones importantes en el desarrollo de nuevos productos	41
2.8. Disponibilidad de materia prima	42
2.9. Carta de especias utilizadas en botanas en diferentes países	43
2.10. Composición de algunos almidones	44
3.1. Codificación de las muestras utilizadas	78
3.2. Codificación de las muestras seleccionadas de la evaluación preliminar	84
4.1. Clasificación de las harinas por su calidad panadera	90
4.2. Análisis proximal de las harinas en base húmeda (g/100)	90
4.3. Análisis proximal de las harinas en base seca (g/100)	90
4.4. Datos fisicoquímicos de una harina comercial extrudida y freída	91
4.5. Datos fisicoquímicos de una harina comercial extrudida y freída (con adiciones de almidón)	92

	Pág.
4.6. Datos fisicoquímicos de una harina galletera extrudida y freída adicionada con almidón	92
4.7. Datos fisicoquímicos de una harina panadera extrudida y freída	93
4.8. Datos fisicoquímicos de una harina pastelera extrudida y freída	93
4.9. Resultados de la evaluación preliminar para los diferentes productos extrudidos y freídos	94
4.10. Resultados de la evaluación sensorial con consumidores	95
4.11. Resultados estadísticos obtenidos para el efecto de la expansión	97
4.12. Resultados estadísticos obtenidos para el efecto de la absorción de aceite	98
4.13. Resultados estadísticos obtenidos para el efecto de la textura	99
4.14. Análisis estadístico de la F de Fisher para las pruebas fisicoquímicas	104
4.15. Medias para Harinas-Respuesta por Harinas-Harinas	105
4.16. Análisis de intervalos múltiples para Harinas-Respuesta por Harinas-Harinas	105
4.17. Análisis de varianza por una vía	105
4.18. Análisis estadístico de la F de Fisher para la evaluación sensorial	106
5.1. Características distintivas de varios tipos de extrusores	109
5.2. Cuadro de cargas de la planta de extrusión	122
5.3. Condiciones y características de extrusores de alimentos para botanas de “pellet”	132
5.4. Resultados de factores comunes para el escalamiento de extrusores de tornillo simple	132
C.1. Datos experimentales de las pruebas fisicoquímicas	157
C.2. Datos experimentales para la expansión	158
C.3. Datos estadísticos promedio de la absorción de aceite	159
C.4. Datos experimentales promedio para la obtención del coeficiente de fractura	160

Índice de figuras

Figura	Pág.
2.1. Estructura de los cereales	21
2.2a. Gráfica típica de un amilógrafo	26
2.2b. Gelatinización del almidón	27
2.3. Diagramas de secado	60
2.4. Perfiles de temperatura durante el secado	62
2.5. Mecanismo correcto de secado	65

2.6.	Mecanismo de secado incorrecto	66
2.7.	Diagrama de presecado	70
2.8.	Diagrama de secado. Vista frontal	71
2.9.	Cambios en el aceite de la fritura	72
3.1.	Gráfica típica del texturómetro Brabender Struct-o-Graph	81
3.2.	Esquema tradicional de trabajo para una evaluación sensorial	83
4.1.	Superficie de respuesta del efecto de expansión	100
4.2.	Corte transversal de la superficie de respuesta obtenida para el efecto de expansión	100
4.3.	Superficie de respuesta del efecto de absorción de aceite	101
4.4.	Corte transversal de la superficie de respuesta obtenida para el efecto de absorción de aceite	101
4.5.	Superficie de respuesta del efecto de textura	102
4.6.	Corte transversal de la superficie de respuesta obtenida para el efecto de textura	102
4.7.	Respuesta promedio de la aceptación a nivel de consumidores	107
5.1.	Diagrama del proceso general de elaboración de botanas de tercera generación	116
5.2.	“Layout” de la planta de extrusión	119
5.3.	Diagrama hidráulico de la planta de extrusión	120
5.4.	Diagrama unifilar para la planta de extrusión	121
5.5.	Subestación de la planta de extrusión	123
5.6.	Distribución de tableros eléctricos de la planta de extrusión	124
5.7.	Efecto de HR en el secado de “pellets” (Temperatura de aire y velocidad de aire constante)	140
5.8.	Efecto de la temperatura en secado de “pellets” (HR constante y velocidad de aire constante)	140
5.9.	Efecto de la velocidad de aire en el secado (temperatura variable)	141
D.1.	Zonas en que puede conceptualizarse el interior de un extrusor	162
D.2.	Flujos de material en un extrusor	165
D.3.	Perfiles de velocidad posibles dentro del canal del tornillo	166
D.4.	Diagramas esquemáticos de extrusores con tornillos de alta y baja fricción	171
D.5.	Distribución de esfuerzos cortantes en función de la velocidad rotacional del tornillo y la temperatura	172
D.6.	Viscosidad aparente en función de la velocidad rotacional del tornillo y la temperatura	173
D.7.	Viscosidad aparente en función de la temperatura y el contenido de humedad del material a extrudir	174

RESUMEN

Los productos alimenticios tipo botana, elaborados mediante un proceso de extrusión y formulados a partir de harina de trigo, han tomado un auge importante en el mundo entero. La calidad en la harina de trigo es muy diversa, ya que una harina puede ser apta para panificación y mala para la elaboración de galletas y pastas. Su calidad depende en gran medida de las propiedades de la proteína, así como del destino que se le dé a la harina. En el presente estudio diferentes variables de operación, como la temperatura de extrusión, la velocidad rotacional del tornillo y la humedad inicial de la materia prima, se modificaron utilizando varios tipos de harina de trigo, a fin de encontrar las condiciones óptimas de operación y el tipo de harina de trigo que dieron como resultado un producto tipo botana de excelente calidad. Los experimentos se llevaron a cabo en un extrusor Wenger, modelo X-5, variando la humedad de la materia prima en 30, 33 y 35% y las revoluciones del tornillo sinfín en 600, 900 y 1200 rpm. La temperatura en el extrusor se controló en sus diferentes secciones mediante resistencias (75-80, 80-85, 90-95 y 60-65°C). Se emplearon harinas de cuatro tipos: una comercial, mezcla de trigos blandos, la segunda una harina galletera, la tercera una pastelera y, por último, una panadera. El contenido de almidón en la formulación original se varió en 0, 7.5, 15 y 25%. A los productos obtenidos se les realizaron pruebas de determinación de humedad, de grado de expansión, de absorción de aceite y de evaluación de textura en un texturómetro Brabender (Struct-o-graph). La evaluación del sabor se llevó a cabo empleando una prueba escala hedónica y, posteriormente, se realizó un estudio de análisis de varianza. Los resultados obtenidos de las pruebas de humedad, absorción de aceite, expansión y textura, indicaron que el mejor producto se obtuvo al utilizar una velocidad rotacional de 600 rpm, 35% de humedad y utilizando harina de tipo pastelera. Estas condiciones de operación se confirmaron con los resultados del modelo de superficie de respuesta en los que se observó una mayor expansión y menor absorción de aceite al disminuir la velocidad de giro del tornillo sinfín y una mejor expansión con el aumento de humedad. Con el estudio preliminar de las condiciones óptimas de operación y la elección de la mejor harina, se llevaron los resultados como punto de partida para un desarrollo a nivel industrial. Así, la selección, supervisión del montaje y arranque de una planta industrial que procese 350 kg/h, fue el otro objetivo importante de la presente investigación aplicada. En esta parte se estudiaron los equipos comerciales de mezclado y acondicionamiento de la materia prima, el extrusor cocedor, el extrusor formador, el equipo de la etapa de secado y se seleccionaron los idóneos. Se llevó a cabo la supervisión del montaje y del arranque de los equipos, poniendo en operación, una planta industrial de botanas de trigo de tercera generación.

Palabras clave: Botanas, tercera generación, trigo, cocción-extrusión, extrusor formador

ABSTRACT

Snack food products, made using wheat flour processed by extrusion cooking, are becoming an important subject worldwide. Wheat flour quality is very heterogeneous, since a type of flour may be adequate for bread preparation and bad for cookies and pastas. Its quality depends upon wheat proteins properties, consistent with its further use. In this study different extrusion operating variables, such as extrusion temperature, screw rotational speed, and raw materials initial moisture content were modified utilizing various types of wheat flours, in order to find the optimum operating conditions and the best wheat flour type for a snack with excellent organoleptic or sensory quality. The experiments were carried out in a model X-5 Wenger extruder, varying raw materials initial moisture contents (30, 33, 35%), screw rotational speed (600, 900, 1200 rpm), and controlling extruder temperature using electric resistances in the different sections (75-80, 80-85, 90-95, 60-65°C). Four different types of wheat flours were used: a commercial one that is a mixture of weak wheat flours, a cookies flour, a cakes flour, and a bread flour. The starch contents in the original formulation varied in 0, 7.5, 15, and 25%. The products obtained were analyzed (moisture contents, expansion degree, oil absorption, and texture measurements using a Brabender texturometer (Structograph)). Taste evaluations were carried out using scalar hedonic tests, and later on, an analysis of variance was performed. Results obtained from moisture contents, oil absorption, expansion, and texture indicated that the best product was obtained using a rotational speed of 600 rpm, 35% moisture contents, and cake flour. These operating conditions were confirmed with a surface response model that showed a higher expansion and a lower oil absorption when screw rotating speed was reduced as moisture contents were increased. These operational characteristics were the starting point for the industrial scale equipment starting up conditions. Selection, supervision of mounting and starting up of an industrial plant to process 350 kg/h, was the second important objective of this applied research. Commercial available equipments characteristics and performance were studied and the mixing and conditioning equipments as well as the cooker extruder and the former extruder and the drying equipments were selected. Supervision of the operation, considering the conditioning sep of the raw materials, permitted the operation of an industrial scale plant to produce wheat flour snacks of the third generation.

Key Words: Snacks, third generation, wheat, extrusion cooking, extrusion forming

Glosario

A	Área de transferencia, L^2
A_1	Peso de pesafiltro más muestra
a	Constante empírica (ec. E-8)
B	Peso de pesafiltro más muestra después del secado (estufa)
b	Profundidad de la “cama” (ec. E-6)
Botana	Palabra árabe que significa piel de carnero preparada. En México, aperitivo, del latín <i>aperitivus</i> , que sirve para abrir el apetito, comida que suele acompañar a las bebidas que se toman antes de una comida principal
C_f	Coefficiente de fractura del producto
C_{pliq}	Calor específico del agua, L^2/t^2T
C_{psol}	Calor específico de material seco, L^2/t^2T
Churro	Fritura de sartén, de la misma masa que se emplea para los buñuelos y de forma cilíndrica estriada
D	Diámetro del tornillo del extrusor (Ecuación 2-1), L
d	Diámetro promedio del producto, L (o espesor de la capa de sólido que se seca)
“Dado”	Del inglés “die”, boquilla formadora
D_c	Dimensión característica (Ecuación E-8)
D_1	Difusividad líquida, L^2/t
DMS	Diferencia mínima significativa de Fisher (análisis estadístico)
e	Error experimental para el modelo de superficie de respuesta
especia	Sustancia para sazonar manjares y guisados
extrudir	Palabra del latín “ <i>extrudere</i> ”, empujar hacia fuera, expulsar
F	Fuerza de compresión del texturómetro, ML/t^2
G	Velocidad de la masa de aire (ec. E-8)
GL, G_1	Grados de libertad (estadística)
H	Altura del álabe del tornillo del extrusor (Ecuación 2-1) o profundidad del canal del tornillo del extrusor (ec. D-2 2-3), L
H_a	Humedad del aire
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección, M/t^3T
H_s	Humedad en la superficie
HTST	Siglas en inglés para designar equipos que operan a alta temperatura pero con tiempos de residencia de los alimentos muy breves (“High temperature short time”)
K	Constante para convertir kVA a energía calorífica

K_g	Coeficiente de transferencia de masa, moles/tL ²
kVA	Potencia requerida por el extrusor, ML ² /t ³
k_1	Función de la velocidad constante (Ecuación E-14)
L	Calor latente de vaporización a T _s , cal/g
LSD	Siglas en inglés para designar la diferencia mínima significativa (“Least Significant Difference”)
M	Masa promedio del producto, M
m	Constante empírica (ec. E-8)
M_{fv}	Masa de la fracción vaporizada en un balance de calor, M
M_{liq}	Flujo de humedad (agua), M/t
M_{sol}	Flujo de material seco, M/t
N	Velocidad rotacional del tornillo del extrusor (Ecuación 2-1), rpm
NPSH	Siglas en inglés para designar la “cabeza neta positiva de succión” (bombas)
n	Constante empírica (Ecuación E-8)
P	Presión (Ecuación D-4 2-5)
p_a	Presión parcial de vapor de agua en el aire, M L ⁻¹ t ⁻²
p_s	Presión de vapor en la superficie, M L ⁻¹ t ⁻²
Palomitas	Producto de maíz reventado, ya sea sobre una superficie caliente o con aceite (la palabra azteca o náhuatl era “izquiltl”, que brinca o brota, esquite, era su nombre original, aunque ahora equivocadamente se le da este nombre al maíz tierno hervido)
“Pellets”	Palabra del latín pila, bola, pequeñas bolas, churros
“Pretzel”	Bizcocho brillante y salado en forma de 8. Del alemán “brezel”, a su vez del latín “brachium”, brazo delgado
Q_a	Flujo de arrastre dentro del extrusor, L ³ t ⁻¹
$Q_{boquilla}$	Flujo de material a través de la boquilla, L ³ t ⁻¹
Q_{neto}	Flujo neto dentro del extrusor, L ³ t ⁻¹
Q_p	Flujo de presión dentro del extrusor, L ³ t ⁻¹
Sago	Es una sustancia granular usada en la cocina, similar a la tapioca. Es la médula de la planta <i>Cycas revoluta</i> o cica, la cual debe lavarse muy cuidadosamente para eliminar sus toxinas naturales con objeto de formar una masa y de ella una harina. Su uso más extendido es en las islas Molucas, en Papua y en Nueva Guinea
Tapioca	Es una sustancia granular usada en la cocina, similar al sago. Es el tubérculo de la planta conocida como <i>cassava</i> o <i>tapioca</i> o <i>mandioca</i> o yuca (<i>Manihot esculenta</i>), la cual tiene ramas rojas o verdes. Las toxinas de las raíces de la variante de ramas rojas son menos dañinas para los humanos que las de la verde. Por ello, los tubérculos de la variante de ramas rojas se consumen

directamente, mientras que los de la verde requieren de un tratamiento para eliminar las toxinas. Se consume ampliamente en Centro y Sudamérica

“Trabato”	Nombre en italiano para un secador con vibración
T_a	Temperatura de bulbo seco del aire, T
T_s	Temperatura de la superficie de secado (bulbo húmedo), T
t_c	Tiempo de secado, velocidad constante, t
t_f	Tiempo de secado (velocidad decreciente), t
t_r	Tiempo de relajación (tiempo que tarda el punzón en fracturar el producto), t
Totopo	Botana de maíz cortada en forma triangular, tortilla de maíz tostada, del náhuatl “totopóchtic”, cosa muy tostada, de “totonqui”, cosa caliente y “pochíctic”, cosa esponjada
V	Velocidad de movimiento de capas de fluido, L/t
V_b	Velocidad del tornillo con respecto al barril. Puede dividirse en dos componentes, V_c y V_d , L/t
V_c	Componente transversal de la velocidad V al canal que no afecta directamente el flujo, pero contribuye al mezclado y corte, L/t
V_d	Componente de la velocidad V en la dirección longitudinal al canal y es el responsable del flujo por arrastre, L/t
V_r	Velocidad de recirculación promedio, L/t
W	Ancho del canal, L
W	Contenido promedio de humedad
W_c	Contenido crítico de humedad (humedad final al término del período de velocidad constante)
W_e	Contenido de humedad en equilibrio
W_0	Contenido de humedad inicial del producto
X	Contenido de humedad
X_1	Revoluciones por minuto para el modelo de superficie de respuesta, 1/t
X_2	Humedad de la muestra para el modelo de superficie de respuesta
Y	Variable del modelo de superficie de respuesta, tipo de respuesta polinomial

Letras griegas

γ	Rapidez de deformación. 1/t
Δ	Cambio en alguna propiedad, diferencia, gradiente
λ	Calor latente de vaporización, cal/g
μ	Viscosidad, $M L^{-1} t^{-1}$

ν	Viscosidad cinemática, $L^2 t^{-1}$
ρ	Densidad del fluido, $M L^{-3}$
Σ	Sumatoria
π	3.14159...

CAPÍTULO 1

Introducción

El interés por desarrollar nuevos y diferentes métodos para producir alimentos completos, balanceados, higiénicos que satisfagan la enorme demanda que cada día crece con la población, es una de las principales preocupaciones de la vida actual. Esto se puede observar desde la manipulación genética de plantas y animales, hasta la búsqueda de una mejor utilización de los recursos tradicionales y no tradicionales y así encontrar nuevos procesos de alimentos y técnicas de conservación y empaque.

El reto tecnológico es presentar los alimentos de forma tal que se conserven las características nutritivas y sensoriales para ser aceptado por el consumidor. La diferencia entre alimentos convencionales y los productos alimenticios fabricados es que en éstos los componentes básicos –proteínas, grasas e hidratos de carbono – pueden obtenerse de cualquier fuente natural y combinarse a voluntad junto con otros nutrimentos, sabores y colores a fin de obtener como resultado final un producto atractivo en cuanto a su composición y sus propiedades sensoriales. Las innovaciones tecnológicas han hecho esto posible lo que permite crear nuevos productos alimenticios a partir de diferentes procesos y materias primas.

Uno de los problemas más importantes que se enfrentan al tratar de llevar a cabo estos nuevos procesos, es el de obtener la textura adecuada para cada tipo de alimento, la cual debe simular lo mejor posible las características sensoriales de alimentos naturales. Existen actualmente muchas técnicas para el desarrollo de productos con características y textura apropiadas y de éstas la **extrusión térmica** viene a ser una de las más importantes.

El proceso de **extrusión** es un procedimiento cada vez más popular en la elaboración de cereales, botanas, procesamiento de granos y harinas y en la industria de alimentos para animales, basándose en materias primas que contienen proteínas y almidón. Presenta múltiples ventajas, la principal, es que los ingredientes sufren una serie de transformaciones que se llevarían a cabo en varias operaciones unitarias (mezclado, cizallamiento, cocción, secado y texturización) en un solo paso, rápido y eficiente.

Dentro de los productos alimenticios fabricados con base en la **extrusión**, las botanas han venido incorporándose de manera exitosa al tipo de vida del hombre actual. El presente estudio se refiere exclusivamente a botanas extrudidas desarrolladas con base en harina de trigo, siendo el trigo la planta más ampliamente cultivada en el mundo y una fuente de proteínas e hidratos de carbono muy importante para la dieta del hombre.

1.1. Problemática

El mercado de los alimentos tipo botana ha desarrollado un acelerado crecimiento durante los últimos años. El consumo cada vez mayor de estos alimentos, justifica el interés por su estudio a fin de poder ofrecer al consumidor productos con mejores características funcionales y nutricias. De ninguna manera se pretende justificar que una botana sustituya a una comida formal, pero sí se puede pedir que la botana sea una comida complementaria y esporádica en el transcurso del día que resulte nutritiva, sana y sabrosa.

Las alternativas tecnológicas disponibles para su elaboración, en especial la ***extrusión***, ofrecen múltiples ventajas ya que vienen a sustituir prácticas rudimentarias y francamente insalubres con las cuales se han venido elaborando las botanas con anterioridad. Además de minimizar equipos y operaciones unitarias en un solo proceso, esto se traduce en ahorros de tiempo, energía y, por ende, costos. Se dispone adicionalmente de un amplio grado de versatilidad y flexibilidad para combinar diferentes materias primas y obtener mejores productos. Por otro lado, las ventajas de tipo microbiológico son indiscutibles ya que los productos son fabricados bajo condiciones que no permiten el desarrollo de microorganismos y como prácticamente el proceso en su totalidad es automático, no hay contaminación por contacto humano.

Esta tecnología puede permitir el desarrollo de formas interesantes de presentación de los productos que resultan muy atractivas para el consumidor, sobre todo para los niños, entre las que pueden mencionarse formas y siluetas de animales, enrejados tipo canasta, diseños tridimensionales, etc. Así, con esta tecnología no sólo se pretende elaborar productos atractivos a los niños y al consumidor en general, sino además, ofrecer alimentos más nutritivos y lo más limpios y sabrosos posibles, ofreciendo al consumidor lo que se puede considerar, una buena botana.

En esta tecnología se tiene como base la elaboración en primera instancia de un producto seco, conocido en el mercado y en la industria como “pellet” el cual puede procesarse de diferentes maneras. Estos ofrecen varias ventajas:

- 1.- Por tratarse de un material seco, se tiene una mayor vida de anaquel del producto. Conservan su calidad sin deteriorarse por lo menos un año después de haber sido producidos, en condiciones adecuadas de almacenamiento, como son el no estar expuestos a humedad y calor excesivos, antes de su procesamiento final que, generalmente, es la fritura y su subsecuente saborización.

2.- Los “pellets” requieren de un menor espacio de almacenamiento ya que ocupan mucho menor volumen en relación a su tamaño expandido después de la fritura, comparándolos con las botanas que son directamente expandidas.

3.- Una mejor flexibilidad en la producción, ya que se pueden elaborar, almacenar y procesar a diferentes tiempos y lugares dependiendo de los requerimientos de la producción y del mercado.

4.- Menores costos de distribución, en particular cuando deben trasladarse a grandes distancias e incluso exportarlas, gracias a su menor volumen y a que el producto no se altera fácilmente.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar la producción de alimentos extrudidos de trigo, tipo botana, elaborados a partir de diferentes harinas y formulaciones a nivel de laboratorio, así como aplicar esos resultados a nivel industrial.

Objetivos particulares

A nivel de laboratorio:

- Comparar el efecto de diferentes condiciones de ***extrusión*** por medio de pruebas fisicoquímicas y de textura a fin de conocer su influencia en las características de los productos.
- Comparar el efecto de las diferentes harinas y las variaciones de formulaciones por medio de pruebas fisicoquímicas y de textura.
- Encontrar el producto más aceptado por el consumidor por medio de un análisis sensorial con el mejor tipo de harina y la proporción de almidón óptima (formulación ideal).

A nivel industrial:

- Seleccionar una planta de extrusión y supervisar el montaje y arranque de los diferentes equipos.

- Realizar diferentes pruebas tomando en cuenta los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y discutir sus resultados con fundamentos obtenidos de las revisiones bibliográficas.

CAPÍTULO 2

Antecedentes

2.1. El trigo

El trigo es un cereal, miembro de la familia Gramínea y es la planta más ampliamente cultivada en el mundo. El cultivo del trigo puede incluso superar la cantidad de todas las demás especies productoras de semillas silvestres domesticadas. Al parecer este cereal fue una de las primeras plantas cultivadas. Se remonta a tiempos muy lejanos, habiéndose encontrado trigo carbonizado de hace 6700 años en la localidad de Jarmo al este de Irak. Cuando domesticó el trigo, el hombre sentó las bases de la civilización occidental y actualmente los cereales constituyen más del 60% de la energía y las proteínas en la dieta humana ⁽⁵⁹⁾. El trigo es el más importante de los cereales, del cual se cultivan cerca de diez especies, de las cuales sólo dos tienen interés comercial:

- *Triticum vulgare*
- *Triticum durum*

El *triticum vulgare* se muele para producir harina, que se emplea para el pan, galletas y demás productos de panadería y bollería.

El *triticum durum*, aunque en algunas regiones se emplea en la producción de pan, preferentemente se utiliza como sémolina para la fabricación de pastas alimenticias.

Los principales países productores a nivel mundial son la antigua URSS, EEUUA, China, Canadá y en la CE, son Francia e Italia.

2.1.1. Fisiología

Los miembros de la familia Gramínea que producen granos de cereal generan frutos secos. Este tipo de fruto es una cariósida que vulgarmente se denomina grano y que está formada por una cubierta del fruto o pericarpio que rodea la semilla. La semilla está constituida a su vez por un embrión o germen y el endospermo, encerrados dentro de una epidermis nucelar y de la cubierta de la semilla ⁽²²⁾.

En la Figura 2.1 se muestra una cariósipide o grano de trigo en sección longitudinal y transversal. La longitud de los granos es, por término medio, de 8 mm y el peso de 35 mg. El tamaño de los granos varía ampliamente según la variedad y según la posición en la espiga. Los granos de trigo son redondeados en la parte dorsal (el mismo lado del germen) y poseen un surco a lo largo de la parte ventral (lado opuesto al germen).

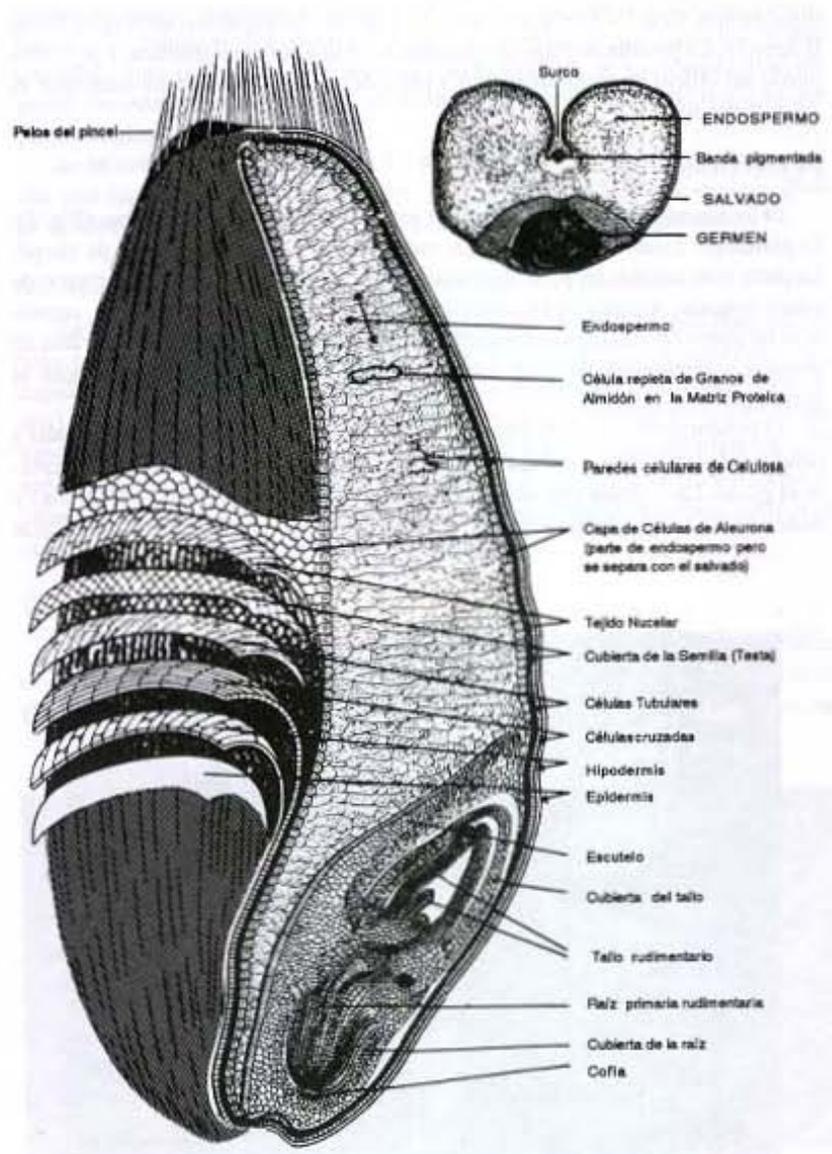


Figura 2.1. Estructura del grano de trigo ⁽³³⁾

La textura (dureza) y color de los granos de trigo varían en gran medida y parece que están relacionados con fuerzas de cohesión en el endospermo. El color, generalmente blanco o rojo (aunque también puede ser púrpura), depende del pigmento en la cubierta de la semilla. El grano de trigo está formado por ⁽³³⁾:

- Pericarpio, que rodea toda la semilla y está constituido por varias capas. El pericarpio exterior es lo que los harineros llaman alas de abeja (beeswings). La parte más interna del pericarpio exterior está formada por restos de células de pared delgada. El pericarpio interior está formado por células intermedias, células cruzadas y células tubulares. Se estima que comprende el 5% del grano y está formado por un 6% de proteínas, 2% de cenizas, 20% de celulosa y 0.5% de grasa, completando el resto presuntas pentosanas.

- Cubierta de la semilla y epidermis nucelar. La cubierta de la semilla está unida firmemente a las células tubulares por su lado exterior y a la epidermis nucelar por el interior. Está compuesta por tres capas: una cutícula exterior gruesa, una capa pigmentada (en los trigos coloreados) y una cutícula interior fina. La cubierta de la semilla de trigo blanco tiene dos capas de células comprimidas de celulosa con poco o nada de pigmento.

- Capa de aleurona que rodea al grano por completo, incluyendo el endospermo feculento y el germen. Es la capa exterior del endospermo. Se elimina durante la molienda y junto con la epidermis nucelar, la cubierta de la semilla y el pericarpio constituyen lo que el molinero llama salvado. Así, el salvado está constituido por las capas externas del grano de trigo, cuya función principal es la de protección del grano. Contiene principalmente celulosa y sales, por lo que, aunque no tenga valor alimenticio para el hombre, es útil para el organismo porque tiende a acelerar el paso de los alimentos a través del tracto digestivo. En los sistemas modernos de molienda, el salvado se separa en la molturación, mientras que antiguamente se separaba mediante el cernido. La composición promedio del salvado se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición del salvado ⁽⁷¹⁾

Humedad	13%
Proteínas	17 a 19%
Grasas	4 a 5%
Azúcar soluble	2 a 2.5%
Azúcar insoluble	66.5%
Sales minerales	6 a 7%
Vitaminas	B1 y B2

- Germen o embrión, abarca el 2.5 – 3.5% del grano y está constituido por dos partes principales: el eje embrionario y el escutelo; es relativamente rico en proteínas (25%), azúcar (18%), aceite (16% del eje embrionario y 32% del escutelo es aceite) y cenizas (5%). No contiene almidón pero es bastante rico en vitaminas B, además de muchas enzimas y vitamina E (tocoferol total). Sus azúcares son principalmente sacarosa y rafinosa. El germen generalmente se elimina, porque contiene grasas que limitan la conservación de la harina. Separadamente, se utiliza como alimento humano, generalmente añadido a la dieta.

-Endospermo, el contenido y paredes celulares del endospermo constituyen la harina. Está constituido por tres tipos de células: periféricas, prismáticas y centrales. Las células están repletas de granos de almidón incluidos en una matriz proteica. La mayor parte de la proteína es el gluten, las proteínas de reserva del trigo. Cuando el trigo es duro hay una fuerte adherencia entre proteínas y almidón. El enlace entre ambos es fuerte. En el trigo blando la proteína no cubre la superficie del almidón y los enlaces almidón-proteína se rompen con facilidad. Además de la diferencia de dureza, el aspecto del endospermo es una característica importante del trigo. Algunos trigos son vítreos, coriáceos o de aspecto traslúcido, mientras que otros son opacos, harinosos o farináceos. Tradicionalmente se asocia la calidad vítrea con la dureza y alto contenido en proteína y la opacidad con la blandura y escasez de proteína. El endospermo es la parte más importante a efectos de la alimentación. La mayor parte de la harina proviene del endospermo. Es menos rico en proteínas, grasas, sustancias minerales, vitaminas y enzimas que el germen y el salvado, pero es tal vez la única parte que contiene almidón. La composición del endospermo se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Composición del endospermo ⁽⁷¹⁾

Humedad	14 a 16%
Proteínas	8 a 14%
Grasas	0.5 a 1.4%
Almidón	65 a 72%
Pentosanas	1.5 a 2%
Sales minerales	0.5 a 0.6%
Vitaminas	B Ácido nicotínico E

2.1.2. Aporte nutricional

El trigo, junto con los demás cereales, proporciona casi la mitad (47%) de las proteínas de la dieta en todo el mundo. El trigo tiene un contenido de proteínas del 12% aproximadamente pero, como los demás cereales, las proteínas son de una calidad inferior en comparación a las encontradas en los alimentos de origen animal como carne, leche y huevos ya que como grupo son deficientes en lisina y bajos en triptófano y metionina. La composición del grano de trigo es la siguiente⁽¹⁶⁾:

Humedad	8 a 17%
Proteína	7 a 18%
Lípidos	1.5 a 2.5%
Hidratos de carbono	
Almidón	60 a 75%
Pentosana	6.2 a 8%
Celulosa	1.9 a 5%
Azúcares:	
Maltosa	0.6 a 4.3%
Sacarosa	0.2 a 0.6%
Nutrientes inorgánicos	1.5 a 2%
Vitaminas	B1 B2 Ácido nicotínico E

Los cereales, en general, son fuentes baratas de energía, proporcionan 700 a 800 calorías por kg. Los granos completos son buenas fuentes de hierro, tiamina y niacina y fuentes moderadas de riboflavina. Los cereales almacenan energía en el grano en forma de almidón. La cantidad de almidón contenida en el grano de trigo es diferente según sea la variedad, pero generalmente oscila entre 60 y 75%.

Los lípidos⁽⁶⁾ que se encuentran en los cereales son muy complejos principalmente porque están formados de un gran número de clases de compuestos químicos. En el trigo, el germen es el que tiene la mayor cantidad de lípidos y éstos contienen el porcentaje mayor de fosfolípidos. Entre muchos de los compuestos lipídicos que posee, se encuentra la vitamina E (3.9 mg/100 g harina integral).

El trigo es una buena fuente de componentes minerales, de las cuales el 61% del total están concentradas en la capa de aleurona. Las vitaminas se concentran en la aleurona, en el escutelo o en ambos⁽³³⁾.

El trigo integral es una buena fuente de celulosa lo que proporciona volumen al tracto gastrointestinal. Las harinas refinadas proporcionan principalmente energía a partir del almidón y algo de proteína incompleta, lo mismo que nutrimentos inorgánicos (minerales) y vitaminas a menor concentración ya que son eliminadas en cantidades variables cuando se separa del grano el salvado, germen y partes externas del endospermo.

2.2. *Propiedades funcionales*

2.2.1. *Almidón*

El almidón está constituido básicamente por polímeros de D-glucosa. Químicamente se distinguen dos tipos de polímeros: amilosa que fundamentalmente es un polímero lineal y amilopectina que está fuertemente ramificado. El almidón se encuentra en las plantas en forma de granos. En los cereales y otras plantas superiores, los granos se forman en plastidios. Estos plastidios que forman el almidón se llaman amiloplastos⁽⁶⁾.

En los cereales que tienen gránulos de almidón simples como el trigo, cada plastidio contiene un gránulo. El trigo tiene dos tipos de granos de almidón: los grandes lenticulares y los pequeños esféricos. Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría debido a que su estructura está altamente organizada y presenta una gran estabilidad debido a las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes. Los gránulos de almidón muestran birrefringencia o la típica “cruz de malta”; esta propiedad es debida al alto grado de estructuración del grano, lo que no se ha de confundir con cristalización⁽³³⁾.

Cuando el almidón se coloca en agua y comienza a calentarse empieza un proceso lento de absorción del agua en las zonas intermicelares amorfas, que son las menos organizadas y las más accesibles ya que los puentes de hidrógeno no son tan numerosos ni tan rígidos como en las áreas cristalinas. A medida que se incrementa la temperatura se retiene más agua y el gránulo empieza a hincharse y a aumentar de volumen⁽²³⁾ (Figura 2.2a.).

El cambio de volumen y la absorción del agua son reversibles y el calentamiento del sistema, hasta justamente por debajo del punto de gelatinización (pérdida de birrefringencia), no originará ninguna otra alteración (Figura 2.2b.).

Sin embargo, el calentamiento a temperaturas superiores produce alteraciones irreversibles que se hacen patentes con el amilógrafo^(29, 35). El amilógrafo mide la viscosidad del sistema mientras se está calentando a velocidad constante (1.5°C/min). Entre 50 y 57°C, la viscosidad aumenta, esto coincide con la pérdida de birrefringencia (orden). El calentamiento prolongado

en exceso de agua conduce a un aumento de la viscosidad, resultado de la absorción de agua e hinchamiento del almidón. Al continuar calentando se distorsiona el gránulo de almidón y pasa a la solución el almidón soluble. Esta solubilización y la continua absorción de agua son los responsables del aumento de la viscosidad. Estas alteraciones que se producen después de la gelatinización se conocen como “empaste” (*pasting*).

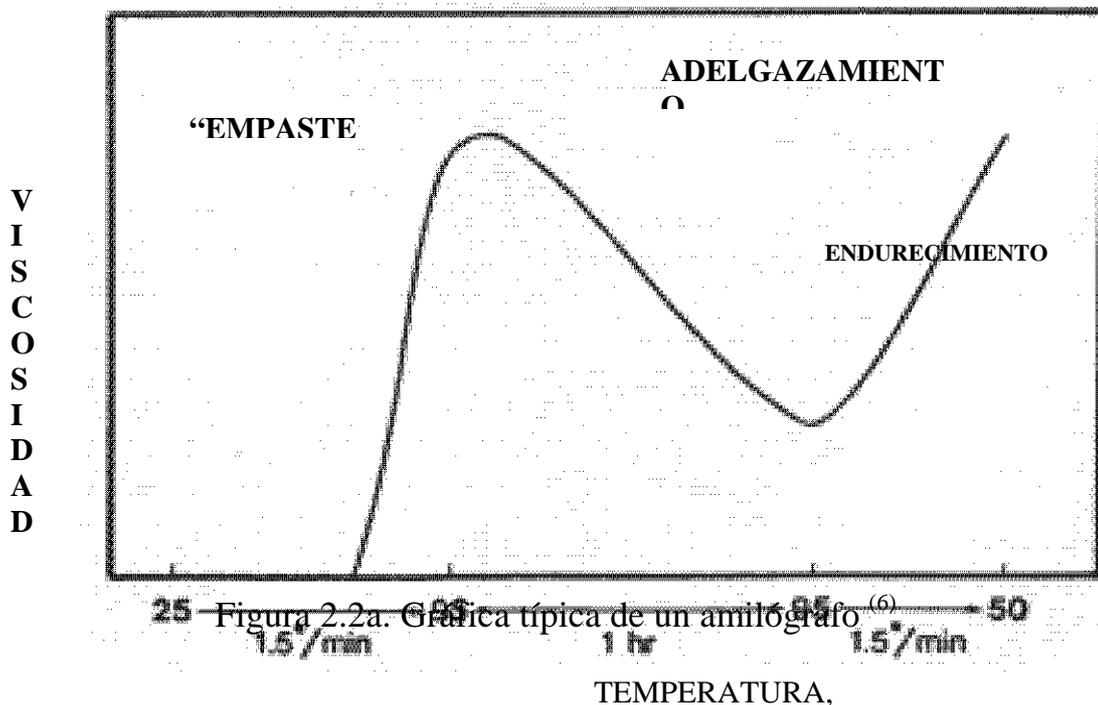


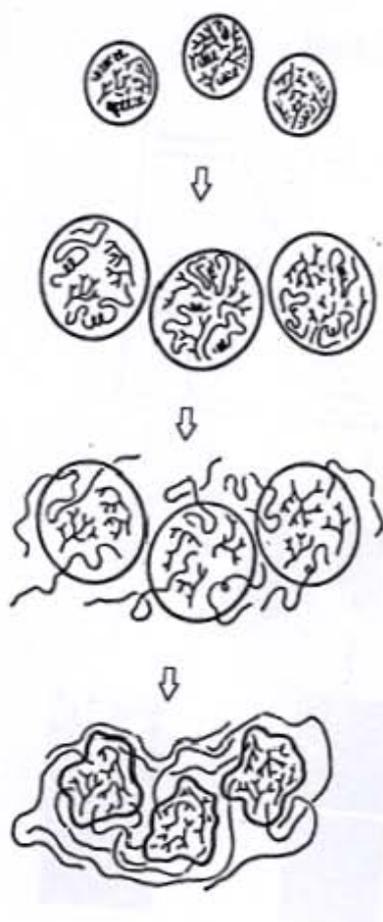
Figura 2.2a. Gráfica típica de un amilógrafo

La solubilización del almidón es continua. No es completa mientras no se haya solubilizado totalmente la estructura granular. En exceso de agua, esto se producirá a temperaturas superiores de 120°C. En el amilógrafo el calentamiento se interrumpe a 95°C, manteniendo esta temperatura durante una hora. Entonces es cuando se dice que el almidón está “cocido” (*cooked*).

La viscosidad del sistema disminuye marcadamente mientras se mantiene la temperatura a 95°C durante una hora. Esta disminución se debe a la orientación de las moléculas de almidón soluble en el sentido de la agitación del sistema, fenómeno conocido como “adelgazamiento” (*shear thinning*). Tras este periodo viene un enfriamiento controlado de 95 a 50°C, lo que da lugar a un rápido aumento de la viscosidad, lo que se conoce como “endurecimiento”

(*setback*) y es producido por una disminución en la energía del sistema, que permite más enlaces de hidrógeno, aumentando así la viscosidad.

Cuando el almidón “empastado” se deja enfriar se forma un gel. Al “envejecer” el gel, o si se congela y descongela, las cadenas de almidón tienden a interactuar fuertemente entre sí, forzando al agua a salir del sistema (sinéresis). A mayor tiempo de almacenamiento mayor interacción entre cadenas de almidón y eventualmente se da la formación de cristales (retrogradación). Como el área cristalizada altera el índice de refracción, el gel se va volviendo más opaco a medida que la retrogradación progresa y se vuelve rígido como goma.



Gránulos de almidón nativos formados de amilosa (lineal) y amilopectina (ramificada)

La adición de agua rompe la cristalinidad de la amilosa y abre las hélices. Los gránulos se solubilizan

La adición de calor y más agua causa una mayor solubilización. La amilosa comienza a salirse de los gránulos

Los gránulos, que contienen ahora en su mayoría amilopectina, se colapsan y están embebidos en una matriz de amilosa formando un gel

Figura 2.2b. Gelatinización del almidón ⁽⁵⁴⁾

2.2.2. Proteínas

Las proteínas se clasifican según su solubilidad en:

- 1.- Albúminas que son proteínas solubles en agua.
- 2.- Globulinas insolubles en agua pura, pero solubles en disoluciones salinas diluidas
- 3.- Prolaminas solubles en alcohol etílico de 70%
- 4.- Glutelinas solubles en ácidos o bases diluidas.

La mayor parte de las proteínas fisiológicamente activas (enzimas) son albúminas y globulinas, las cuales, en los cereales, están concentradas en las células de aleurona, salvado y germen y a concentraciones inferiores en el endospermo.

Desde el punto de vista de la nutrición estas proteínas tienen aminoácidos equilibrados, ricas en lisina, triptófano y metionina.

Las prolaminas y glutelinas son las proteínas de reserva y no se encuentran en el pericarpio o en el germen. Las prolaminas y glutelinas en el trigo son pobres en aminoácidos indispensables. Las proteínas de reserva del trigo son únicas por ser proteínas funcionales. No poseen actividad enzimática, pero tiene la facultad de formar una masa que retendrá gas y rendirá productos horneados esponjosos. Estas características particulares del trigo se atribuyen fundamentalmente a las proteínas del gluten y son insolubles en agua. El gluten es un complejo que está formado por dos grupos principales de proteínas: gliadina (una prolamina) y glutenina (una glutelina).

Las gliadinas son extremadamente pegajosas cuando están hidratadas. Tiene poca o nula resistencia a la extensión. Parecen ser las responsables de la cohesividad de la masa.

Las gluteninas son de cadena ramificada, elásticas pero no coherentes. Confieren a la masa su propiedad de resistencia a la extensión.

Las proteínas del gluten son pobres en aminoácidos básicos (como lisina). Tienen baja densidad de cargas y sus fuerzas de repulsión son pequeñas y por lo tanto las cadenas proteínicas pueden interactuar entre sí muy fácilmente, lo que favorece la formación de la masa. Estas proteínas se unen muy fácilmente a los lípidos.

La tenacidad como parámetro es un criterio ampliamente utilizado en México que se define como la resistencia de la masa de harina de trigo a la extensión, se mide con el alveógrafo y se debe a la composición del gluten. Otros parámetros de medición utilizados en la industria para medir la calidad de la harina son la elasticidad y la fuerza general.

Las masa conocidas como fuertes son cohesivas y requieren, por lo mismo, mayor tiempo de mezclado; son, por lo tanto, muy tenaces.

Las llamadas débiles, que no desarrollan una estructura adecuada y se colapsan al amasarse, son poco tenaces.

La fuerza en general del trigo es una característica relacionada con sus propiedades panaderas y los trigos con alto contenido de proteína se denominan trigos “fuertes o de fuerza” y los trigos con bajo contenido proteínico reciben el nombre de trigos “flojos o débiles”.

La dureza del trigo proviene de la mayor continuidad de la matriz de proteínas dentro de las células y de los enlaces más firmes de los gránulos de almidón con esta matriz.

La calidad panificadora de los trigos depende en gran parte de la cantidad y calidad proteica. La proteína tiene la capacidad de hidratarse y absorber hasta tres veces su peso. En la elaboración de masa, las proteínas se hidratadas formando una matriz en donde se encuentran embebidos los gránulos de almidón.

La estructura primaria está determinada por la secuencia de aminoácidos. La estructura secundaria está determinada por dobleces que forman estructuras tridimensionales características, como lo es la hélice. Además de estas estructuras las proteínas se doblan para formar subunidades globulares que proporcionan la estructura terciaria. Cuando se unen varias subunidades globulares para formar una unidad multimérica se tiene la estructura cuaternaria.

Las ligaduras químicas presentes en las proteínas que juegan un papel importante en sus propiedades físicas son: covalentes, peptídicas y puentes disulfuro entre y dentro de las cadenas de aminoácidos, no covalentes, como las iónicas, hidrógeno y de van der Waals.

Las ligaduras peptídicas son importantes en la formación de la estructura primaria y en el comportamiento de las masas, tanto por la longitud de las cadenas polipeptídicas como por las propiedades especiales de las proteínas del trigo de formar estructuras laminares⁽⁹⁾.

Las ligaduras disulfuro en proteínas se consideran como las ligaduras más significativas en la reología de las masas. Esto se manifiesta a través de varias

evidencias, como es el endurecimiento de la masa que producen los mejorantes oxidativos de las harinas, que se piensa se debe a la formación de ligamentos disulfuro cruzados entre proteínas, a partir de grupos tiol (SH).

Las ligaduras cruzadas entre proteínas pueden explicar solamente las deformaciones elásticas y no las deformaciones permanentes de las masas. Las deformaciones permanentes se pueden realizar sólo cuando las ligaduras cruzadas no son permanentes. Esta propiedad de las masas se ha aceptado que se debe a reacciones de intercambio tiol disulfuro.

Las deformaciones elásticas o temporales dependen del número de ligaduras disulfuro y las deformaciones viscosas o permanentes dependen del número de grupos tiol. El intercambio de grupos tiol a disulfuro deberá aumentar la viscosidad y la elasticidad. Pequeños cambios en los contenidos de grupos disulfuro tienen un amplio efecto en la fuerza del gluten. Se calcula que sólo el 3% de los grupos disulfuro son reológicamente efectivos. La relación de grupos disulfuro a grupos tiol se ha demostrado que está relacionada con la dureza de la masa y el tiempo de desarrollo de la masa. Cuando la relación SS/SH es muy alta, la masa es demasiado dura y la calidad del pan, volumen y textura de la miga disminuye.

Las ligaduras iónicas, de puentes de hidrógeno y de van der Waals tienen efecto en la solubilidad de las proteínas del trigo y pueden ser las responsables de la velocidad de intercambio tiol disulfuro.

2.2.3. Clasificación

Tecnológicamente los trigos se clasifican de acuerdo a: tiempo de siembra, dureza del grano, color y variedad ⁽⁶¹⁾ (Tabla 2.3).

En México, el trigo se siembra en los ciclos de otoño-invierno (Noroeste y Bajío) y en el ciclo primavera-verano (Estado de México, Tlaxcala) y son de hábito de primavera mientras que los trigos canadienses son de hábito de invierno y primavera.

En México ⁽¹²⁾ los trigos se clasifican en 5 grupos de acuerdo con sus propiedades químicas y físicas (Tabla 2.4).

Los trigos del grupo I, llamados generalmente “trigos de gluten fuerte”, son generalmente duros y altos en proteínas, altos en peso específico, buena fuerza general, buena elasticidad del gluten, excelente volumen de pan y buen rendimiento de harina. Los trigos de este grupo son ideales para panificación mecanizada.

Tabla 2.3. Clasificación tecnológica del trigo ^(35,40)

De acuerdo con:	Se clasifica en:	Características:
Textura del endospermo	Vítreo Opaco	Translúcidos, brillantes Harinosos, oscuros
Dureza del endospermo	Extraduro Duro Medio duro Blando	Harina gruesa Harina gruesa Harina fina Harina fina
Fuerza en general (W del alveógrafo)	Fuerte	Panificación, alto contenido proteínico
	Medio fuerte	
	Débil	Galletas y pasteles
Color	Rojo Blanco	Pigmento en pericarpio Ausencia de pigmento en pericarpio

Los trigos grupo II llamados “trigos de gluten medio fuerte” son semiduros, generalmente más bajos en proteínas, más bajos en fuerza general y rinden un pan de menor volumen que los trigos del grupo I. Este segundo grupo de trigos se usa generalmente en industria semimecanizada para pan francés o pan dulce de fermentación, también son adecuados para galletas saladas.

El trigo del grupo III es un grupo de “trigos de textura suave” de gluten débil y extensible, baja fuerza general, ideales para la industria galletera. Actualmente existe escasez en la producción de estos trigos.

Los trigos del grupo IV son trigos de textura dura y gluten tenaz, poco extensibles y de mala calidad para panificación.

Los trigos del grupo V son los llamados “cristalinos” y se usan principalmente para la fabricación de semolina para pastas.

Tabla 2.4. Clasificación del trigo en función de su calidad panadera ⁽¹²⁾

Grupo	Gluten	Calidad panadera	Uso industrial	Proteína	Rendim. harinero	Características
I. Trigos fuertes o duros	Fuerte, elástico Mejorador de trigos débiles	Muy buena	Panificación mecanizada Pan de molde	11.0%	72.5 %	Excelente volumen de pan y rendimiento harinero
II. Trigos medio fuertes	Medio fuerte, elástico Mejorador de trigos débiles	Buena	Panificación Manual Pan francés o dulce	10%	72 %	Menor volumen de pan
III. Trigos suaves	Débil y extensible	Regular	Elaboración de galletas	9.5 %	72.5 %	Bajo volumen del pan
IV. Trigos tenaces	Corto y tenaz	Mala	Pasteles y galletas	9.0 %	70.0 %	Masa más tenaz que el grupo III
V. Trigos cristalinos	Corto y tenaz	Pobre	Elaboración de pastas y semolina	12 %	63.0 %	El gluten no forma estructuras laminares durante el amasado. Presencia de carotenoides.

En resumen, esta clasificación comprende los siguientes aspectos:

- La textura del endospermo, ya que esta característica está relacionada con la forma de romperse durante la molienda.
- El contenido de proteínas, porque las propiedades de la harina y los usos que se hacen de ella están relacionados con esta característica.

La fuerza en general del trigo es una característica relacionada con sus propiedades panaderas y los trigos con alto contenido de proteína se denominan trigos “fuertes o de fuerza” y los trigos con bajo contenido proteínico reciben el nombre de trigos “flojos o débiles”.

La dureza del trigo proviene de la mayor continuidad de la matriz de proteínas dentro de las células y los enlaces más firmes de los gránulos de almidón con esta matriz.

En México, las harinas se clasifican de acuerdo a su contenido de cenizas en varios grupos que, en orden ascendente de contenido de cenizas, son:

- extrafina o alta patente

- fina o patente
- semifina
- estándar

2.3. Harina. Calidad industrial y obtención

La harina de trigo se define como el producto obtenido a partir de trigo común, mediante el proceso de molienda, donde se elimina parcialmente el germen y el salvado y el resto se reduce a un tamaño de partícula adecuado⁽³²⁾.

Las harinas de trigo son ampliamente usadas en la dieta del ser humano. Su uso en la fabricación de pan, galletas, pasteles, pastas y botanas está ampliamente extendido en la mayoría de los países.

La calidad de la harina de trigo es un término hasta cierto punto ambiguo ya que una harina puede ser buena para un cierto fin y mala para otro; así, una harina para pan es generalmente mala para galletas y pastas y viceversa. Los grados de calidad, como ya se mencionó, tienen que ver con la variedad del trigo, el tipo de proceso al que se somete y los aditivos agregados⁽³⁵⁾.

Para evaluar la calidad de una harina se usan generalmente tres tipos de pruebas mediante las cuales se trata de predecir si una harina es buena para pan, galletas, pasteles, etc. El primer tipo es el de las pruebas físicas y químicas y las principales son: humedad, proteínas, cenizas, color, actividad diastásica y granulación. El segundo son las funcionales y consisten en elaborar, a nivel de laboratorio, el producto de trigo para el cual la harina esté destinada. El tercer grupo de pruebas mide las propiedades plásticas de la masa y para esto se utilizan diferentes dispositivos de reología y algunos de éstos son: el farinógrafo, el extensógrafo, el expansógrafo y el alveógrafo⁽¹¹⁾.

La calidad molinera del trigo en el molino se mide por el rendimiento y pureza de la harina que se obtiene de él. Los buenos trigos harineros bien acondicionados y molidos en condiciones determinadas, rinden relativamente más harina de menor contenido en cenizas y menos color que los malos. La pureza de la harina significa que está libre de partículas de salvado. El salvado (casarilla de trigo) es de color obscuro mientras que el endospermo es blanco, por lo tanto el color de la harina indica su grado de contaminación con salvado. También lo indica el contenido en cenizas, que es mucho más elevado en el salvado que en el endospermo^(32,62).

El rendimiento y pureza de la harina dependen de la forma en que el endospermo se separa del salvado a partir del grano, de la flexibilidad del salvado, de la fragilidad del endospermo y de la facilidad con que se tamiza la harina.

Refiriéndose a los diferentes tipos de trigo mencionados en el apartado anterior, se sabe que si los molinos de trigo tienen el cuidado de seleccionar sus trigos por los grupos mencionados, almacenándolos separadamente para usarlos adecuadamente, tienen en gran parte asegurada la calidad de su harina. Desafortunadamente, por las diferencias geográficas entre las regiones donde se cultivan las diferentes variedades y los molinos de trigo es, en ocasiones, difícil para cada molino obtener la variedad adecuada para fabricar la harina que satisfaga las demandas del mercado local. La importación del trigo contribuye también a este último factor.

El no contar los molinos con los trigos adecuados, hace que los molinos dependan de los otros dos factores (proceso y aditivos) para asegurar en su harina la calidad necesaria.

Del análisis de cenizas y proteínas en las harinas de México se deduce que hay un bajo porcentaje de harinas extrafinas y que éstas, en general, son bajas en proteínas. El bajo porcentaje de harinas extrafinas probablemente se debe a la demanda del mercado. El bajo porcentaje de proteínas puede deberse principalmente a la insuficiente fertilización de la tierra.

Las harinas especiales tienen mejor color y contenidos de proteína casi siempre más altos y el mercado las paga, generalmente, a precios más elevados.

A través de las fases de la molienda del trigo, se obtienen una serie de productos de características diversas: harinas, harinas finas, salvados, salvados finos y desechos de molienda.

Si se considera que el grano está formado por un 12.5% de salvado, 85% de endospermo y un 2.5% de germen, el objetivo es obtener el 85% que dará la harina. No obstante, en la práctica, el rendimiento de la molienda es siempre inferior a este 85%. Normalmente, la medida porcentual de los productos obtenidos de la molturación es:

Harinas	75 a 78%
Harinas finas	2.5 a 3%
Salvados	20 a 22%
Desechos de la molienda	0.2 a 2%

Esta distribución siempre va ligada a los distintos tipos de trigo y a los diversos procesos de molienda, con diferentes rendimientos de extracción.

Se entiende por calidad de una harina, como su capacidad para dar un producto final de excelentes características sensoriales como el sabor y el olor, de buen valor nutritivo y de costo competitivo. Los factores que influyen en la calidad están en gran parte ligados a los componentes genéticos de las diversas variedades y a su eventual variación, debidas a la fertilización, al clima y a las infecciones de la planta. Otros factores están relacionados a las alteraciones debidas a varios procesos como aquellos que transforman el grano en harina.

Entre los componentes proteínicos de la harina predominan la gliadina y la glutenina que, fuertemente hidratadas durante el amasado forman el gluten, principal responsable de las propiedades mecánicas de la masa. No obstante, hay que tener en cuenta que el resto de las proteínas presentes en la harina inciden de forma más o menos importante en las características de la masa.

El proceso de transformación del trigo en harina consta de dos pasos principales: el acondicionamiento y la molienda.

Durante el acondicionamiento es necesario limpiar el trigo con el objeto de eliminar la paja, semillas extrañas, polvo, insectos y otros contaminantes que generalmente acompañan al trigo. Para esto se aprovechan propiedades tales como diferencias de tamaño, forma y peso específico entre el trigo y sus contaminantes para separarlo de los otros. Generalmente, el trigo se pasa por una lavadora, aunque existe en la actualidad una tendencia a la limpieza en seco. Una vez limpio el trigo, se procede a ajustar la humedad de 16 a 17% y se deja reposar de 24 a 72 horas, dependiendo si el trigo es suave, duro o cristalino y si se trata de harina para galletas, pan o pastas.

El proceso de molienda consta generalmente de cinco trituraciones y algo más del doble de compresiones. En las trituraciones se va dejando paso a paso el endospermo del pericarpio o salvado. En las compresiones las sémolas o harinas gruesas se reducen a consistencia de harina y se termina de separar el salvado de la harina al mismo tiempo.

De la habilidad del molinero dependen tanto el porcentaje de harina que es capaz de separar del salvado como el porcentaje de cenizas o minerales que contiene la harina; así, el primero puede variar del 70 al 80% y, el segundo, de 0.4 a 0.7%. Se puede ver que la diferencia de 10% en rendimiento puede representar una pérdida o ganancia para el molino. El objetivo del molinero es desde luego obtener el máximo rendimiento con el mínimo de cenizas, manteniendo la capacidad del molino al máximo.

2.4. Las botanas

2.4.1. Cronología

La palabra “botana” es un término actual que en el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española se asocia a México, donde se ha venido utilizando en el lenguaje cotidiano y se entiende como un tipo de alimento ligero que se come casualmente sin constituir un alimento formal.

A continuación se transcribe un listado cronológico de la elaboración de botanas ^(25,54).

1400	La tribu de los aztecas, en México central, consume maíz en grandes cantidades, más que cualquier otro alimento. La tortilla, que originalmente la cocían con el sol o sobre una olla de barro calentada por dentro y después en <i>comales</i> , es el ancestro de lo que actualmente se conoce como los <i>totopos</i> usados en muchas ocasiones como botana.
1621	Primer día de Acción de Gracias en Plymouth Rock, Mass., Estados Unidos de América. Los pioneros incluyen palomitas de maíz en el menú, preparadas por reventado de granos por los indígenas del área (originalmente conocidos en México como <i>esquites</i>).
1853	Vacacionando en Saratoga Springs, N.Y. EEUUA, el magnate de la compañía de ferrocarriles Commodore, Cornelius Vanderbilt, regresa sus papas fritas a la cocina argumentando que eran demasiado gruesas. Un chef llamado George Crum sarcásticamente le prepara las papas tan delgadas casi como la hoja de un papel y lo que inicialmente quiso ser una broma se convirtió en un éxito y actualmente son las famosas botanas de papas fritas.
1861	La primera compañía comercial de “pretzel” se establece en Lancaster County, Pa, EEUUA. La botana torcida tiene su origen antes de la edad media y originalmente era conocido como “pretiola” o “pequeña recompensa”.
1895	La primera papa frita vendida al público en tiendas aparece en Cleveland, EEUUA, llevada por mercaderes que la surtían en sus carretas. Ohio se convierte en el centro de esta industria botanera.
1926	En Monte-rey Park, Calif.,EEUUA, Laura Scudder crea a nivel casero, el primer papel encerado que hace manualmente, creando así las primeras bolsas de empaque para alimento tipo botana. Con anterioridad, el alimento se surtía en dispensadores o barriles.
1928	Se crea el antecesor del celofán. Esta innovación y, posteriormente, la llegada del “glassine” por medio de la Dixie Glass Co., cambia el curso para la industria de las botanas.
1932	Elmer Dooling y I.J. Filler son los primeros en introducir al comercio estadounidense los <i>totopos</i> (“Corn Chips”). Filler registra la marca como “corn chips” en Texas, mientras que Dooling comienza a vender su producto de puerta en puerta con el nombre de “Fritos”.

1932	Herman Lay comienza a construir una industria gigante para elaborar productos tipo botana, H.W. Lay Co., en Atlanta, EEUA. En 1961 surge de esta compañía Frito-Lay, actualmente perteneciente al grupo PepsiCo y es la compañía más grande de este tipo de industria.
1953	Producción comercial en México de “churritos”, productos extrudidos de masa de maíz y “chicharrones de maíz”, que se introducen a la venta en establecimientos públicos con éxito.
1964	Primera producción comercial de tostaditas (“tortilla chips”) que se introducen a la venta en establecimientos públicos siendo también un rotundo éxito.
1971	Se fabrican las primeras botanas elaboradas a partir de hojuelas de papa deshidratada y no a partir de rebanadas de papas fritas y se introducen al mercado en los EEUA y otros países.
1974	La FDA en EEUA propone poner etiquetas a productos tipo botana que den información nutrimental al consumidor, ya que cada día se le da mayor interés por la salud pública y para definir el precio por unidad de masa de los productos.
1980	La venta de botanas a base de maíz alcanza en EEUA por primera vez \$1,000 millones de dólares (o un billón, como ellos le llaman).
1981	La industria de botanas CIPA en Brasil, desarrolla un interesante producto a base de maíz de tipo dietético, bajo en grasas. Le llamaron “Skinny” y se convirtió en todo un éxito.

2.4.2. Clasificación

Tras esta palabra (en inglés “Snack Food”) hay toda una historia, como se mostró en la cronología anterior y, lo más importante, un desarrollo impresionante de tecnología digno de tomarse en cuenta. Actualmente, este tipo de alimento comienza a tomar un rumbo interesante ⁽¹⁰⁾ en lo que a nutrición se refiere.

Las botanas (Snack food) ⁽²⁴⁾ son alimentos que se comen precisamente en el momento de ser desempacados, como las galletas, frituras ⁽⁶⁵⁾, panes y cereales para el desayuno (Tablas 2.5 a 2.9). La evolución de la botana en tiempos actuales puede describirse de acuerdo a “generaciones específicas de productos”. Así se tiene:

Primera Generación.- Comprende papas fritas convencionales y galletas.

Segunda Generación.- Son los productos directamente expandidos elaborados a partir de cereales y almidón.

Tercera Generación.- Productos intermedios con gran variedad de formas y texturas obtenidos a base de mezclas de cereales, almidón (modificado y no

modificado), formados mediante *extrusión* pero expandidos con otros procesos, como aire caliente, fritura, microondas, etc.

Cuarta Generación.- Productos que además de ser extrudidos son rellenos. Estos son una combinación de directamente expandidos y “snacks” de tercera generación, presaborizados (antes de la *extrusión*), rellenos de cremas o jaleas frutales durante el proceso.

Actualmente el último desarrollo es el de las botanas 3-D (tridimensionales) que se pueden considerar la *Quinta Generación*.

La botana objeto de este estudio es una botana del tipo de *Tercera Generación*.

Las botanas de *tercera generación* presentan muchas ventajas interesantes de mencionar.

1.- Por ser productos elaborados con base en el proceso de *extrusión* se tienen productos muy confiables en cuanto a su calidad microbiológica (por su baja humedad y por estar sometidos a temperaturas y presiones elevadas).

2.- La calidad del alimento en cuanto a su contenido de vitaminas es bueno, ya que el tiempo a que se someten los materiales a elevadas temperaturas, es muy corto ⁽²⁶⁾.

3.- Como producto final de la etapa de secado se obtiene lo que se conoce en términos del idioma inglés, como “pellet” (no teniendo desafortunadamente traducción literal al idioma español). Constituye un alimento seco, con una humedad baja (10 al 12% aproximadamente) que hace de estos productos alimentos muy estables con larga vida de anaquel.

4.- La variedad de ingredientes a combinar es prácticamente enorme. Así se puede tener posibilidad de manejar materias primas que pudiesen dar productos nutrimentalmente valiosos.

5.- Los productos no requieren de conservadores.

6.- Al freír los “pellets” para su expansión, absorben menor cantidad de aceite que las papas fritas y si son expandidos por medio de aire caliente se vuelven alimentos prácticamente libre de grasas.

Tabla 2.5. Distribución de botanas en el mundo ⁽⁵⁴⁾

PROPORCIONES ESTIMADAS DE DISTRIBUCION EN EL MERCADO MUNDIAL DE BOTANAS					
BOTANA	Europa¹ (%)	Asia y SE asiático² (%)	América Latina (%)	EEUUA (%)	Medio Oriente (%)
Botanas de “pellets”	20-25	35 a 40	15 a 20	5-10	25 a 35
Papas fritas tradicionales	45 a 50	10 a 15	20 a 25	30 a 35	20 a 25
Otros ³	25 a 35	45 a 55	55 a 65	55 a 65	40 a 55

Nota:

- 1 Excluyendo Rusia y bloque de países independizados
- 2 Excluyendo China, India e Indochina
- 3 Incluyendo botanas de maíz, frituras tipo tortillas, “pretzels”, “collets”, etc.

2.5. Funcionalidad de los ingredientes

Los ingredientes básicos utilizados convencionalmente en la elaboración de botanas de tercera generación a base de harina de trigo son:

Harina de trigo

Principal ingrediente de la elaboración de estos productos. Le proporciona a la masa su extensibilidad, coherencia y elasticidad, porque al combinarse con el agua se desarrolla un complejo coloidal con características viscoelásticas muy particulares, ya mencionadas con anterioridad denominado gluten. La harina contribuye con estructura y rigidez a los productos. Sus tipos, propiedades, obtención y características han sido discutidas en párrafos anteriores.

Tabla 2.6. Distribución de botanas de acuerdo a la tecnología de los procesos
(54)

<i>Europa</i> ¹	<i>Asia y SE asiático</i> ²	<i>Latinoamérica</i>	<i>EEUUA</i>	<i>Medio Oriente</i>
Botanas directamente expandidas Papas fritas extrudidas y cortadas Botanas de “pellets” Papas fritas fabricadas a partir de “pellets” Botanas 3-D de “pellets” Botanas extrudidas de formas diferentes de “pellets” Botanas extrudidas rellenas Botanas de maíz Botanas tipo tortilla Kroepeck galletas (camarón/pescado) Papas fritas tradicionales Palomitas “Pretzels” Arroz inflado	Kroepeck galletas (camarón/pescado) Botanas de “pellets” formas diferentes Botanas de “pellets” Botanas directamente expandidas Botanas 3-D Botanas de maíz Papas fritas de “pellets” Botanas rellenas Papas fritas tradicionales Palomitas “Pretzels” Arroz inflado	Chicharrones Botanas de “pellets” Botanas directamente expandidas Botanas de maíz Botana tipo tortilla Papas fritas de “pellets” Papas fritas tradicionales Palomitas	Botanas directamente expandidas Botanas de maíz Botanas tipo tortilla Botanas de “pellets” Papas fritas de “pellets” Papas fritas tradicionales Palomitas “Pretzels” Arroz inflado	Botanas directamente expandidas Papas fritas de “pellets” Botanas de “pellets” Papas fritas tradicionales Palomitas

Nota:

¹ Excluyendo Rusia y bloque de países independientes

² Excluyendo China, India e Indochina

Tabla 2.7. Consideraciones importantes en el desarrollo de nuevos productos
(54)

<i>Parámetros</i>	<i>Europa¹</i>	<i>Asia y SE asiático²</i>	<i>América Latina</i>	<i>EEUUA</i>	<i>Medio Oriente</i>
Sin grasa	++	+	+	+++	+
Bajo en grasas	+++	++	+	+++++	+
Bajo en sal (sodio)	++	+	+	+++	+
Sin colesterol	++	+	+	+++	++
Adicionado con fibra	++	++	+	+++	+
Bajo en calorías	+++	+	+	+++	+
Nuevos sabores	+++	+++	++	++++	++
Nuevas formas	+++++	++++	+++	++	++++
Nuevas texturas	+++	++	+	++++	+
Bajo costo de ingredientes	+++	+++++	+++++	++	+++++

Nota:

1 Excluyendo Rusia y bloque de países independientes

2 Excluyendo China, India e Indochina

+ no tan importante

+++++ extremadamente importante

Tabla 2.8. Disponibilidad de materia prima ⁽⁵⁴⁾

<i>Materia Prima</i>	<i>Europa¹</i>	<i>Asia y SE asiático²</i>	<i>América Latina</i>	<i>EEUUA</i>	<i>Medio Oriente</i>
Harina de tapioca o almidón	+ ³	++++	++++	+ ³	+ ³
Harina de maíz o “grits”	+++++	++++	+++++	+++++	++
Durum semolina	++++	+ ³	++++	+++++	++
Harina de avena	+++	+	+++	+++	++
Derivados de papa ⁴	+++++	+ ³	+	+++++	+ ³
Harina de arroz	+++	+++++	+++	+++	+
Harina de trigo suave	+++++	+ ³	++++	+++++	++++
Harina de soya o proteína	+++	+++	++	++++	+

Nota:

1 Excluyendo Rusia y bloque países independizados

2 Excluyendo China, India e Indochina

+³ Disponible mediante importación

4 Gránulos, hojuelas y almidón de papa

+ Disponible

+++++ Altamente disponible

Tabla 2.9. Carta de especias utilizadas en botanas en diferentes países ⁽⁵⁴⁾

<i>País</i>	<i>Especias favoritas</i>
Italia	Orégano, albahaca, ajo, cebolla, salvia, hinojo, mejorana, pimienta roja
India	Curry, comino, cúrcuma, cilantro, pimienta roja, pimienta negra, jengibre, cardamomo, fenogreco
México	Chile, cilantro, orégano, ajo, cebolla, ajonjolí, canela, limón
Francia	Estragón, chalotes, cebollines, hierbas finas, mejorana, tomillo, pimienta negra, romero
Hungría	Paprika, semillas amapola, ajo, alcaravea, eneldo, pimienta blanca, cebolla y canela
China	Jengibre, semillas de anís, ajo, anís estrella, cebolla, pimienta roja, pimienta blanca, clavo, canela.
Escandinavia	Cardamomo, nuez moscada, eneldo, hojas laurel, pimienta de Jamaica o gorda, pimienta negra, mostaza y canela
Grecia	Orégano, menta, laurel, ajo, cebolla, clavo, pimienta negra, canela, hinojo
España	Azafrán, paprika, ajo, cebolla, perejil, laurel, comino, pimienta gorda
Alemania	Alcaravea, eneldo, cebolla, paprika, jengibre, pimienta de Jamaica, romero, nuez moscada, pimienta blanca
Indonesia	Curry, ajo, pimienta roja, clavo, canela, nuez moscada, jengibre, alcaravea
Medio Oriente	Canela, clavo, nuez moscada, menta, comino, cilantro, eneldo, azafrán, sésamo o ajonjolí, orégano

Almidón

Al combinarse con el agua y gelatinizarse contribuye de manera determinante a la expansión del producto ^(15,27) dando las características de textura deseables al producto final. Con la utilización del almidón, la estructura, la velocidad de rehidratación y la retención del aceite en el producto frito terminado pueden controlarse. Los almidones con un alto contenido de amilopectina dan como resultado productos extrudidos altamente expandidos y de baja densidad. Lo contrario, un almidón químicamente modificado o con alto contenido de amilosa, normalmente producirá un producto extrudido más denso, pero estos almidones tienen la capacidad de reducir la velocidad de captación de humedad, lo que evita se vuelvan pastosos en el ambiente. En la tabla 2.10 se presenta la composición de algunos almidones. Los almidones de los cereales contienen muy bajos niveles de grasas (que quedan en el germen, como ya se mencionó).

Tabla 2.10. Composición de algunos almidones ⁽⁷¹⁾

<i>Almidón</i>	<i>Amilosa</i>	<i>Amilopectina</i>
Almidón de maíz normal	24-26	74-76
Almidón de papa	22-23	Aprox. 77
Tapioca	19-20	Aprox. 80
Sago	20-26	74-80
Almidón de maíz céreo	<1	>99

Las temperaturas (°C) de gelatinización de los almidones son:

Almidón de maíz 62-72
Almidón de papa 56-66
Almidón de trigo 52-63
Almidón de arroz 61-78
Tapioca 58-70
Sago 60-72

Sal

La sal o cloruro de sodio es un ingrediente básico en la producción de alimentos tipo botana.

La sal comestible debe ser fácilmente soluble en agua y, por lo tanto, debe estar exenta de impurezas y tener una granulometría muy fina. Debe poseer una cantidad moderada de yodo para evitar trastornos orgánicos, tener una pureza superior al 95% y ser blanca.

La sal en los productos extrudidos ayuda a la formación del gluten porque lo fortalece permitiendo a la masa retener más el agua y el gas. Así mismo, contribuye al sabor y al control de la expansión y la textura. Influye en la velocidad y grado de hidratación de la harina ⁽⁷¹⁾.

La proporción de utilización varía desde 1.5 a 3% dependiendo del tipo de botana, gusto, equipo y materia prima. Si se tienen harinas recién molidas o débiles se recomienda aumentar la dosis de sal.

La sal debe responder a las siguientes características ⁽⁴⁴⁾:

- Costo adecuado para la producción de productos, por eso en muchas ocasiones se prefiere usar la sal gorda y no la molida por su menor costo, pero en el caso específico de elaboración de los “pellets” de trigo conviene más usar una granulometría fina.
- Su solución acuosa debe ser limpia y sin sustancias depositadas en el fondo
- Debe contener pequeñas cantidades de sales de calcio y magnesio
- Debe ser salada y no amarga.

La cantidad de sal añadida a la masa tiene, en resumen, varias funciones:

- Mejorar las propiedades plásticas de la masa
- Permitir una mejor hidratación
- Restringir la actividad de bacterias
- Favorecer la coloración de la superficie o corteza de los productos
- Mejorar y potenciar el sabor

La dosis y el momento de añadir la sal son dos factores importantes que varían según el tipo de harina y el sistema de elaboración de los productos.

Agentes leudantes

Este tipo de sustancias ayudan a incorporar CO₂ a la masa y a regular la velocidad de esponjamiento.

Agua

Es uno de los factores principales para controlar la temperatura y velocidad de *extrusión* de la masa, así como las características del producto extrudido^(32,68). Afecta la densidad del producto, la expansión, la rehidratación, la gelatinización del almidón y la formación y desarrollo del gluten.

Los tipos de agua que pueden encontrarse son varios, pero los más importantes son:

- a) Aguas duras: son aguas que contienen cantidades apreciables de sales minerales, generalmente de dos tipos:
 - Con sales de magnesio y calcio, normalmente son moderadamente duras, idóneas para los productos amasados, pues los minerales que contienen ayudan a fortalecer el gluten. Si el agua es demasiado dura puede endurecer en exceso el gluten.
 - Aguas con bicarbonatos de magnesio y calcio, que no son indicadas para la panificación.
- b) Aguas blandas: contienen pocas cantidades de sales minerales y afectan al gluten dando masas blandas y pegajosas. Un ejemplo serían el agua destilada y de lluvia. Como compensación habría que aumentar la sal en la fórmula.
- c) Aguas alcalinas: se caracterizan por contener carbonato de sodio principalmente. Debilitan el gluten y reducen su poder de retención del gas.

Agentes mejorantes

Un “mejorante” es una mezcla de aditivos y coadyuvantes químicos cuya misión más importante es la retención de gases y el mejoramiento de texturas⁽⁷¹⁾.

La constitución base de un “mejorante” es la siguiente:

- “emulsionante” o emulgente
- vitamina C (ácido ascórbico)
- enzimas
- azúcares
- antiapelmazantes

otros posibles componentes:

- grasas
- gluten
- estabilizantes
- conservantes
- harinas diversas

Dentro de los “mejorantes”, es interesante mencionar a dos en especial:

Vitamina C (ácido ascórbico)

Es una sustancia oxidante que mejora la masa ya que:

- refuerza las propiedades mecánicas del gluten
- aumenta la capacidad de retención de gas carbónico, dando volúmenes mayores y celdas más uniformes

Hoy en día el ácido ascórbico es el principal agente oxidante utilizado en el mundo de la panadería y derivados, tipificado como E300 e introducido en 1935 por Jorgensen. La dosis máxima autorizada son 20 g por cada 100 kg de harina.

El ácido ascórbico es en realidad un agente antioxidante, pero durante los procesos de amasado incorpora oxígeno transformándose en ácido dehidroascórbico, el cual vuelve posteriormente a descomponerse en ácido ascórbico + oxígeno, actuando así como oxidante. Sin oxidante, las proteínas son más permeables al gas, con el oxidante se forman enlaces entre proteínas, volviéndose éstas más impermeables al gas, y la retención de gases aumenta al tener masas más tenaces, aunque en exceso esto no sería bueno ya que si aumenta mucho la tenacidad la masa no “desarrollará” y se obtendrá menor volumen final en los productos, por lo que hay que buscar un equilibrio.⁽⁷¹⁾

Emulsionantes

Las funciones que desarrollan los emulsionantes en las masas son varias ^(68,71):

- emulsificar
- facilitar los enlaces entre proteínas y almidón
- dar mayor estabilidad a la masa

- estabilizar posibles espumas que se forman durante los procesos de amasado
- retardar el endurecimiento del producto terminado
- lubricar la masa

Los emulsionantes permiten obtener enlaces más fuertes entre los componentes de las masas, con lo cual se obtiene un gluten con mayor elasticidad y viscosidad, teniendo así mayores volúmenes y mejor estructura. A los emulsionantes utilizados en panadería, y que sirven para los “pellets” extrudidos se les llama “acondicionantes de la masa” y promueven las siguientes acciones:

- aumentan la resistencia al tratamiento mecánico de la masa
- favorecen la absorción de sustancias grasas
- promueven el aumento de volumen
- alargan la conservación
- hacen la estructura de la masa cocida más uniforme, fina y regular
- promueven la formación de productos más crujientes
- a consecuencia de las últimas características, aumentan la digestibilidad del producto.

2.6. Proceso de elaboración

2.6.1. Amasado

El amasado consiste en mezclar todos aquellos ingredientes necesarios para la elaboración del producto, con el fin de obtener la elasticidad, la temperatura idónea y un preacondicionamiento de la masa para conseguir el óptimo desarrollo del producto final.

Para empezar a amasar es necesario primero pesar todos los ingredientes de la fórmula, como son la harina, la sal, el almidón y demás “mejorantes”.

El mezclado es necesario para garantizar que todas las materias primas conformen una masa homogénea.

La cantidad de cada ingrediente en la mezcla se determina con relación a uno de ellos.

El ingrediente que sirve de base es generalmente la harina de trigo necesaria para la producción, a partir de la cual se calculan las cantidades de los demás componentes de la fórmula.

2.6.2. Extrusión de alimentos

En los últimos años se ha incrementado el uso de la técnica de **extrusión** para procesar alimentos (del latín *extrudere*, extrudir, empujar o impeler hacia fuera con una bomba un material fundido haciéndolo pasar por una matriz específica para darle forma). En los países en vías de desarrollo se ha dado especial importancia a la **extrusión** de alimentos de origen vegetal, particularmente cereales, leguminosas y oleaginosas, no sólo para darle una forma específica a los alimentos, sino para cocerlos y acondicionarlos a fin de que tengan un mayor valor nutritivo⁽²⁰⁾.

La primera aplicación de la **extrusión** en alimentos se desarrolló en 1935 con un extrusor para la producción de macarrón, mezclando harina de trigo (semolina) con agua y forzando la masa resultante a través de un “dado” o boquilla con la forma de macarrón. El extrusor tipo HTST es una extensión de este extrusor formador⁽³⁹⁾.

La **extrusión** es un proceso que combina diversas operaciones unitarias^(22,38) como el mezclado, la cocción, el amasado y el moldeo. Un extrusor está constituido por un tornillo sinfín, en donde el alimento se comprime, amasa y trabaja hasta la obtención de una masa semisólida que se impulsa o empuja a través de un pequeño orificio. Si en la operación el alimento es sometido a tratamiento térmico, al proceso se le denomina **extrusión** con cocción (o **extrusión** en caliente).

La **extrusión** presenta múltiples ventajas^(3, 19, 20,37,43, 45,67, 68):

- Versatilidad. Cambiando la proporción de ingredientes y las condiciones durante la **extrusión** se puede obtener una gran variedad de productos: “snacks” o botanas, cereales para desayuno, polvos para bebidas, alimentos para bebés, harinas precocidas, proteínas vegetales texturizadas, alimentos para animales, etc.

- Formas de los productos. Los extrusores pueden producir alimentos con formas y texturas que no se pueden obtener mediante otros métodos de producción.
- Alta productividad. Un extrusor tiene una mayor capacidad de producción comparándolo con los sistemas tradicionales que sustituye (sistemas de cocción y formado de alimentos)
 - Alta calidad de los productos. Las altas temperaturas y cortos tiempos de residencia minimizan la degradación de los nutrientes e inactivan sustancias tóxicas ^(1,15,19,26) y microorganismos, incrementando la calidad y vida de anaquel de los productos.
- Gastos menores. La **extrusión** es un proceso más barato ya que se realizan simultáneamente varios procesos, como mezclado, cocción y moldeo, empleando únicamente vapor, electricidad o ambos como fuente de energía y, en proporción, usando menos energía por unidad de masa de alimento procesado.
- Es un proceso automático con gran capacidad de producción.
- No genera efluentes contaminantes.
- Optimización de espacio de producción y almacén. El proceso de **extrusión** minimiza el espacio requerido para la elaboración de los productos ya que se sustituye a varios equipos que se necesitarían usar con otros sistemas de procesamiento convencionales.

El proceso de **extrusión** tiene algunas desventajas y entre ellas se destacan las dos siguientes ⁽²⁰⁾:

- Solamente se pueden manejar sustancias granulares, por lo que el material debe someterse a una operación previa de molienda si su tamaño de partícula lo hace necesario.
- Son equipos de precisión que requieren de maquinado altamente calificado y de personal experto o entrenado en su construcción, ensamblado, operación mantenimiento y reparación.

La boquilla proporciona una contrapresión o retropresión adicional. Para la obtención de productos expandidos se emplean presiones elevadas y boquillas de orificios pequeños. La rápida liberación de la presión que se produce a la salida de la boquilla provoca la volatización instantánea del agua y otros gases que contiene el alimento, dando un producto de baja densidad en el que parte del agua que contiene se pierde por evaporación. Para la elaboración de productos muy densos se utilizan presiones bajas y boquillas de orificios grandes. Así,

algunos materiales preelaborados se obtienen extrudiendo y desecando una masa de cereal pregelatinizada, para obtener gránulos duros, de pequeño tamaño, denominados “pellets”, que pueden almacenarse durante largo tiempo y pueden transportarse fácilmente para la elaboración de otros productos por fritura, tostación o insuflación. Cuando estos productos preelaborados se calientan al aire o en aceite, se reblandecen, adquiriendo por expansión sus características físicas y sensoriales adecuadas. La expansión se produce al eliminarse, en forma de vapor, el agua residual que contienen.

2.6.2.1. Clasificación de los extrusores ^(20,28,54)

Los extrusores para alimentos se clasifican de dos maneras: Termodinámicamente y por la forma con la que se desarrolla la presión.

Desde el punto de vista de la Termodinámica pueden clasificarse en:

- *Extrusores cuasi-adiabáticos (autógenos)*

Estos extrusores generan su propio calor por conversión de energía mecánica. No es necesario añadir calor o enfriar la unidad a través de la chaqueta envolvente. Los extrusores para productos directamente expandidos se considera que se encuentran en este grupo.

- *Extrusores isotérmicos*

En este tipo de equipos se mantiene una temperatura constante a lo largo del extrusor enfriando o removiendo el calor generado por la conversión de la energía mecánica.

- *Extrusores no-isotérmicos no-adiabáticos (politrópicos)*

Estos extrusores trabajan entre las condiciones de los extrusores autógenos y los isotérmicos. Todos los extrusores para alimentos son politrópicos, pero muchos de ellos tienden a estar en condiciones autógenas y otros a ser isotérmicos.

Aunque los extrusores desarrollan varias funciones u operaciones, pueden conceptualizarse como bombas y como bombas se pueden clasificar de acuerdo a la manera como desarrollan la presión:

- *Extrusores directos o de desplazamiento positivo*

Dentro de los extrusores directos están los extrusores tipo pistón y los extrusores de doble tornillo de intermezclado. Prácticamente no ocurre fricción por lo que las propiedades de los productos extrudidos no se ven alteradas de aquéllas de las materias primas originales. Es importante mencionar aquí que en los procesos de *extrusión*, la fuerza de cizalla a la cual se someten los alimentos, es un factor crítico que determina diversos resultados en los productos. En los extrusores de doble tornillo intermezclados, el material se somete a cierta fuerza de cizalla debido al arrastre viscoso entre los canales de intermezclado. El uso más común de estos extrusores es en la elaboración de embutidos como salchichas, botanas de maíz como tipo “churrITOS”, goma de mascar, en la manufactura de chocolate y de alimentos infantiles para preparar bebidas y papillas.

- *Extrusores indirectos o de flujo viscoso*

En estos extrusores, debido al flujo viscoso, se somete el producto a mayor fricción por lo que las características originales del producto cambian. Estos equipos tienen aplicación en la industria de los dulces y confitería en general.

2.6.2.2. Tipos específicos de extrusores

Existen cinco tipos de extrusores que se usan con mayor frecuencia en la industria de alimentos^(3,21):

Extrusor para pastas. Usado para la elaboración de macarrones y productos similares. De los cinco tipos de extrusores, éstos son lo más cercano a considerarse como el extrusor ideal ya que tienen la pared del barril lisa, no hay prácticamente sección de transporte de sólidos y generalmente la geometría del tornillo es constante y es lo más parecido a un extrusor isotérmico.

Extrusor formador de alta presión. Se usa para comprimir y dar forma a una masa pregelatinizada para dar productos que normalmente requieren de un procesamiento posterior como fritura (botanas) o insuflación (cereales). La operación de este tipo de extrusores es muy semejante al extrusor de pastas, sólo que normalmente éstos tienen la pared del barril con ranuras, las que provocan fricción y un incremento en la temperatura y, por consiguiente, mayor calor disipado hacia los alimentos.

Extrusor cocedor de baja fricción. Se utiliza en masas de altas humedades. Es una unidad muy flexible y con una amplia variedad de aplicaciones. El producto cocido debe ser procesado en seguida, por un formador o ser sometido a secado. El esfuerzo cortante aplicado es mayor que en los extrusores formadores, pero debido a la baja viscosidad y alta humedad, la mayor parte de

la energía requerida para la cocción se aplica por calentamiento externo, a pesar de usar barriles con canales profundos y tornillos de compresión alta.

Extrusor Collet. Este extrusor calienta, expande y forma materiales granulares secos tales como harina de maíz para producir productos expandidos como botanas infladas de maíz. Éste es un extrusor de alta fricción y corto tiempo de residencia. Se tiene un alto grado de disipación de energía, canales de barril profundos y se manejan altas viscosidades debidas a las bajas humedades. Por consiguiente, las altas temperaturas, causan evaporaciones violentas de la humedad creando productos expandidos secos. Son máquinas poco flexibles que producen una pequeña variedad de productos. Las altas temperaturas alcanzadas causan cambios reológicos severos y las variaciones en geometría y diseño tanto de barril como del tornillo hacen de su análisis algo muy complicado.

Extrusor cocedor de alta fricción. Este extrusor es muy parecido al extrusor Collet en su operación con la diferencia que aquí el tiempo de residencia es mayor, además de que el exceso de calor generado es removido mediante enfriamiento externo, por lo que se convierte en una máquina más flexible y que puede producir una amplia gama de productos tales como cereales expandidos, botanas y comida para mascotas partiendo de una gran variedad de materias primas e ingredientes para mezclar. El alto grado de fricción y tiempo de residencia mayor ayudan a un mejor mezclado. El agua puede ser inyectada en la sección de alimentación para proporcionar la humedad óptima requerida para cada proceso. La unidad de alimentación generalmente es mayor que en el Collet y los productos obtenidos después de la expansión conservan la alta humedad, por lo que generalmente se requiere de un secado posterior. La temperatura del producto es menor que en el extrusor Collet y se controla variando la humedad en la alimentación y el enfriamiento. Estas diferencias dan como resultado un mayor tiempo de proceso, menor temperatura de cocción y una expansión menos violenta que en el Collet.

2.6.2.3. La texturización de los alimentos en la extrusión

Durante el proceso de *extrusión*, el calor y el trabajo mecánico son los factores que hacen que las macromoléculas pierdan su estructura nativa (estructura terciaria organizada) para formar una masa continua viscosa. El flujo laminar dentro de los canales del tornillo del extrusor y del “dado” o boquilla, provoca un alineamiento de las grandes moléculas en la dirección del flujo, exponiendo puntos de enlace que provocan la formación de enlaces cruzados y una estructura reformada expandible que crea la textura crujiente y masticable de los productos.^(9, 39)

El diseño y las condiciones de operación en un extrusor tienen una influencia decisiva en la textura final de los productos y es conveniente discutir las tres partes en las que puede “dividirse” un extrusor que tienen que ver con los

resultados finales para la elaboración de botanas: el preacondicionador, el tornillo y el dado o boquilla.^(18,45,67,69)

Preacondicionador. El preacondicionador es una cámara a presión o abierta a la atmósfera en donde los ingredientes granulares crudos se humedecen uniformemente y se calientan por contacto con agua o vapor. Los elementos de mezclado/transporte que existen en esta sección imparten poco esfuerzo cortante a la masa y, por lo tanto, modifican muy poco las moléculas en cuanto a su conformación se refiere. El material tiene un mezclado y una hidratación uniforme en esta sección, así como un calentamiento previo a la entrada de la zona de alimentación del tornillo.

Tornillo. La mayor transformación de la conformación molecular de los ingredientes de la alimentación, crudos o preacondicionados que, finalmente, afecta la textura, ocurre por el movimiento del tornillo del extrusor. El calor por fricción o por transferencia a través del barril, junto con la hidratación, desnaturalización y procesos de “fundido” de los materiales de alimentación, transforman a la masa en un material continuo, viscoso y plastificado^(2,39).

El flujo en el canal del tornillo es laminar por las velocidades relativamente bajas y las altas viscosidades de la masa y esto hace que las capas adyacentes de fluido se muevan una respecto a la otra paralelamente sin mezclarse radialmente. La velocidad de movimiento relativo de capas de fluido está definido como una rapidez de deformación γ .⁽²⁹⁾:

$$\gamma = \frac{dV}{dH} = \pi DN / H \quad (2-1)$$

donde:

πDN = velocidad máxima del tornillo
H = altura del álabe

Las macromoléculas de alimento se alinean en el campo de flujo laminar. Estas macromoléculas desnaturalizadas alineadas tienen la posibilidad de crear nuevas estructuras con enlaces intramoleculares cruzados que se expanden y dan textura a los productos. Los enlaces cruzados ocurren entre los sitios electrostáticos expuestos, sitios de enlace iónico, covalente o de hidrógeno, que se acercan tanto que pueden interactuar durante la alineación^(9,13). Las grandes moléculas de alimento tienen dificultad de alinearse en este flujo viscoso y como resultado son susceptibles de ser dañadas por el esfuerzo mecánico.

Los tornillos con altas velocidades de giro (rpm), con poca profundidad de canal y largos tramos que incrementan el tiempo de residencia causan el daño mayor o ruptura de las moléculas nativas^(2,19,27,39,45).

El daño al almidón o a las proteínas reduce la capacidad de formar una matriz elástica que pueda expandir y retener una textura adecuada al paso por el “dado” o boquilla. El material se ve dañado molecularmente si hay baja humedad en la alimentación.⁽²⁸⁾ También la velocidad de alimentación afecta la textura puesto que si es baja se reduce el llenado de los canales del tornillo en la zona de alimentación y con el tornillo parcialmente lleno, el flujo por presión puede ser más significativo, causando mayor circulación en el canal y mayor daño mecánico a las moléculas. Así mismo, el aumento de la velocidad rotacional del tornillo repercute en fricción y daño al material^(1,15,26,45).

El desgaste de los materiales afecta la textura, ya que el flujo de arrastre se afecta al igual que se modifica el flujo por presión y se tiene un producto sobretabajado que tendrá consecuencias en textura.

“Dado” o boquilla. La influencia del (o los) dado(s) o boquillas sobre textura final del producto generalmente no se toma en cuenta ya que, el efecto se considera independiente al tipo de extrusor que se tenga. La forma y diseño del “dado” o boquilla tiene influencia no sólo en la forma final sino también en la textura⁽²⁸⁾. Si el dado tiene una sección de salida que disminuye suavemente, el daño molecular es menor pues se reduce la retropresión del producto. Los recubrimientos de teflón dan el mismo efecto. El resultado neto es que se tienen productos con superficies más suaves. Si se tiene, por el contrario, un dado cuya salida tiene un cambio brusco en su sección transversal y una distancia corta de salida, se causa un daño mecánico mayor a las moléculas del alimento y se tendrán estructuras de celdas más finas, superficie irregular y una menor resistencia al esfuerzo mecánico, lo que se traduce en una estructura más débil y una menor expansión. El daño en la estructura molecular del material en las diferentes fases del proceso repercute de manera directa en la textura. Se mencionó cómo se ven afectadas y reorganizadas las proteínas, pero otro ingrediente muy importante es el almidón (ingrediente predominante en las botanas).

El almidón “nativo” sufre cambios sustanciales dando una desorganización molecular mayor durante la *extrusión*^(27, 28). El almidón pierde su “cristalinidad” nativa, sufre una degradación molecular y frecuentemente forma complejos con lípidos^(7,46). El papel del cizallamiento, temperatura, humedad y composición de la alimentación, son importantes en la transformación del almidón y, por ende, en la textura del producto final. Durante el proceso de *extrusión* el almidón se hidrata parcialmente y es sujeto a esfuerzos mecánicos mientras se somete a transporte y calentamiento. Esto causa daños mecánicos al almidón y su ruptura da lugar a fracciones del polisacárido que resultan ser más digeribles^(14, 17). El calor y la humedad favorecen la pérdida de la cristalinidad.

Si hay una humedad inicial baja se incrementa la viscosidad y hay grandes cizallamientos. La amilopectina no se alinea tan fácilmente en la corriente del tornillo y en la salida del dado por ser una molécula “voluminosa”, lo que da

como resultado una molécula dañada por el proceso y que reduce su tamaño molecular al romperse de algunas ramificaciones. Estos almidones dañados son menos cohesivos que los almidones que se gelatinizan sin dañarse. Consecuentemente, se expanden menos, predominantemente en dirección longitudinal, creando productos de poros menores, texturas más suaves, una mayor solubilidad y un carácter más pegajoso al masticar la botana.

Los productos extrudidos con altos contenidos de humedad tienen poros mayores y las paredes de los poros o celdas son más gruesas, se rehidratan más lentamente, son más crujientes, logran mayor expansión y, en general, una textura más dura y firme.

La amilosa es menos susceptible a sufrir daños mecánicos. Se requieren temperaturas mayores para incrementar su solubilidad. Los productos con mayor proporción de amilosa son más densos, más duros aunque menos expandibles. La amilosa forma complejos con lípidos durante la *extrusión* y esto le ayuda a mantener su conformación nativa^(25,46).

Tanto las moléculas de almidón como las de proteínas se alinean y entrecruzan en el proceso de *extrusión*. La estructura expandida de productos de almidón difiere sustancialmente de los productos extrudidos de proteínas.

Los enlaces cruzados en el almidón se limitan a enlaces hidrofóbicos y puentes de hidrógeno entonces la estructura final y su textura se alteran fácilmente en presencia de agua. Las proteínas forman enlaces entrecruzados en el extrusor con enlaces iónicos y covalentes que son mucho más fuertes, dando texturas insolubles y resistentes para procesamientos posteriores.

El control de la temperatura y el tiempo de residencia en el extrusor tienen mucha importancia en el desarrollo de los productos. La presión del vapor de agua está relacionada con la temperatura (y ésta con la velocidad rotacional rpm) y proporciona la mayor parte de la fuerza necesaria para la expansión cuando el producto sale a presión ambiente. Consecuentemente, la densidad del producto está relacionada con la temperatura de *extrusión*. Existen diferentes formas de control de la temperatura, esfuerzo cortante y velocidad de deformación durante el proceso de *extrusión* en un extrusor de tornillo simple. Se logra, por ejemplo, cambiando el contenido de humedad a los materiales a extrudir o la temperatura. Materiales de baja humedad requieren de mayor energía mecánica para fluir. Una mayor energía mecánica da como resultado mayores temperaturas (porque hay más fricción) y se causa mayor daño al material.

2.6.2.4. Ventajas de la cocción por extrusión

Las ventajas de realizar el proceso de cocción mediante la *extrusión* son:

- 1.- El proceso es sumamente versátil, ya que bajo las mismas condiciones básicas de procesamiento e higiene, más los ingredientes adecuados, se puede producir una amplia gama de productos alimenticios (con o sin suplementos vitamínicos o proteínicos) como cereales para desayuno, alimentos granulados instantáneos, bebidas en polvo, alimentos infantiles, proteínas vegetales texturizadas, harinas precocidas, etc. Con diferentes variables de proceso es factible la producción de un gran número de alimentos balanceados para animales domésticos, ganado, peces y animales de laboratorio.
- 2.- La gelatinización de los almidones de los cereales (ruptura de moléculas por efecto combinado de humedad, calor, presión y esfuerzo cortante) por **extrusión**, da como resultado una mayor absorción de agua en el producto extrudido que mejora la digestibilidad y disponibilidad energética del producto. En la gelatinización⁽⁵³⁾ de los almidones, el efecto de dar forma al producto no tiene importancia o relevancia alguna, la cocción se controla simplemente con el fin de obtener características específicas de gelatinización o dextrinización. Si el contenido de humedad es alto y se tiene baja temperatura, se producirá un grado bajo o medio de gelatinización, mientras que si la humedad baja y la temperatura aumenta en forma razonable, el grado de gelatinización aumentará y se llegará incluso a la dextrinización. Los almidones gelatinizados por **extrusión** son capaces de ligar microingredientes (vitaminas, nutrimentos inorgánicos, colores, sabores, etc.) uniforme e irreversiblemente a través del producto extrudido. Además, las características de solubilidad y textura de los hidratos de carbono cocidos por **extrusión** pueden variarse y adaptarse sobre un extenso intervalo según el producto deseado.
- 3.- Se pueden modificar y reestructurar las proteínas para producir proteínas vegetales texturizadas.
- 4.- El tiempo de cocción en los sistemas HTST⁽³⁶⁾ (high temperature/short time) es muy breve lo que significa una destrucción menor del contenido vitamínico del producto comparado con cualquier otro método de cocción.
- 5.- Los productos cocidos por **extrusión** tienen excelente calidad en cuanto a características bacteriológicas se refiere. Están libres de larvas, patógenos o salmonella. Con esto, la vida de anaquel es superior a la de productos elaborados por otros métodos.
- 6.- Los alimentos precocidos por **extrusión**, además de eliminar los prolongados períodos de preparación, logran una considerable economía en los gastos de combustible.

- 7.- Se pueden cocer ingredientes individuales o mezclas. Esto reduce el costo de procesamiento y además el peligro de contaminación es menor que cuando se tienen que cocer, procesar y luego mezclar ingredientes por separado.
- 8.- En la *extrusión* no hay efluentes ni otros residuos del proceso que contaminen al ambiente. Los únicos residuos serán aquellos derivados del lavado del equipo previo al extrusor (molinos, mezcladores, etc.) y al lavado del extrusor mismo.
- 9.- Se requiere de espacios menores y limitados por toneladas de capacidad de producción y un arreglo adecuado de los componentes del sistema, reduce las necesidades del procesamiento por tonelada de producto.
- 10.- Los extrusores cocedores consumen menos energía total por tonelada de producción comparándolos con otros métodos de cocción y son termodinámicamente más eficientes.
- 11.- La mano de obra requerida es menor que en otros sistemas.
- 12.- El proceso tiene una gran capacidad de producción.
- 13.- Se obtienen diferentes formas, densidades y texturas de productos (chiclosos, blandos, quebradizos, flexibles, firmes, crujientes, etc.) con cambios mínimos en las condiciones del proceso.

2.6.3. Tecnología de secado en botanas de tercera generación

El secado en alimentos o deshidratación se describe como aquella operación unitaria en la cual casi toda el agua o parte del agua presente en el alimento se remueve mediante evaporación o sublimación, como resultado de la aplicación de calor bajo condiciones controladas.⁽⁸⁾ Con esta definición, los métodos alternativos para la eliminación de humedad como filtración, separación por membrana, centrifugación, extracción sólido-líquido y prensado o exprimido son excluidos. El secado solar también se excluye por la dificultad de control del proceso. Los “pellets”, botanas de tercera generación, son generalmente secados mediante aire caliente, por lo que se discutirá en este capítulo este importante paso del proceso de producción de estos alimentos.

2.6.3.1. Secado por aire caliente

En este proceso, el aire caliente se utiliza como el medio de transferencia de calor y de masa durante la evaporación de la humedad. El aire del ambiente se calienta a fin de incrementar su temperatura de tal forma que puede retener mayor humedad, comparada con la que se puede retener a temperatura ambiente. Este aire caliente se hace circular a través del producto de diferentes formas, como podría ser pasándolo perpendicularmente a través de una cama de

producto, o bien pasándolo paralelamente a la cama de producto con corrientes en una misma dirección, corrientes cruzadas, contracorrientes, etc.⁽⁴⁸⁾

Cuando el aire caliente entra en contacto con el producto, la humedad del producto se remueve primero por evaporación de la superficie saturada del sólido y seguido por difusión de la humedad que emigra del interior del sólido hacia su superficie. De los mecanismos internos más comunes de flujo de líquido a través del sólido, están la difusión y la capilaridad.

La evaporación de humedad varía con el tiempo y con el contenido de humedad. Esta variación, se puede estudiar con las “curvas de secado”⁽⁷³⁾ (Figuras 2.3, 2.4), graficando el contenido de humedad base seca (X) contra el tiempo (t). Esta curva representa el caso general de un sólido húmedo perdiendo humedad, primero por evaporación de la superficie saturada que gradualmente decrece en área y, finalmente, por un periodo en donde el agua se difunde en el interior del sólido. Si se diferencia la curva de secado gráfica o numéricamente y los valores dx/dt vs. X o vs. t se grafican, la curva que resulta es la curva de velocidad de secado^(52, 58).

De esta diferenciación se pueden notar dos distintos periodos de velocidades de secado. Primero, un *periodo de velocidad constante* que se muestra como una línea recta de pendiente constante dx/dt y, posteriormente, un *periodo de velocidad decreciente* presentándose un cambio continuo de velocidad a lo largo del ciclo de secado. El punto donde termina el periodo de velocidad constante y comienza el periodo de velocidad decreciente se conoce como *contenido crítico de humedad X_c* .

2.6.3.2. Periodos de velocidad de secado

En el secado por aire caliente se distinguen dos periodos de velocidad de secado que a continuación se detallan⁽⁵⁵⁾:

1.- Periodo de velocidad constante:

- a) La superficie del sólido permanece saturada con agua líquida.
- b) La velocidad de secado depende de la transferencia de calor hacia la superficie de secado.
- c) La transferencia de masa balancea la transferencia de calor y la temperatura de la superficie saturada permanece constante.
- d) El calor es transferido convectivamente del medio secante hacia la superficie del sólido húmedo y la temperatura de la superficie se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo.
- e) La fuerza motriz es el gradiente de presión parcial del vapor de agua entre la superficie del sólido y la corriente de aire

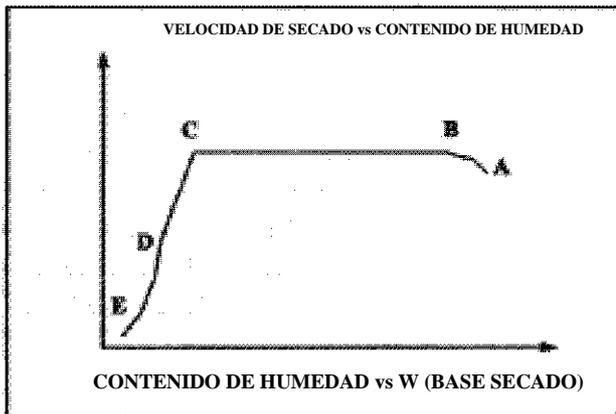
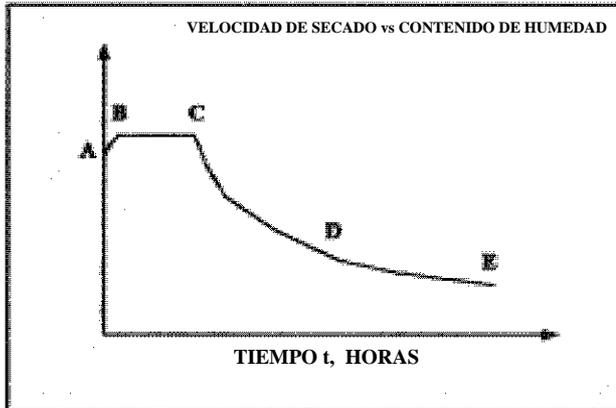
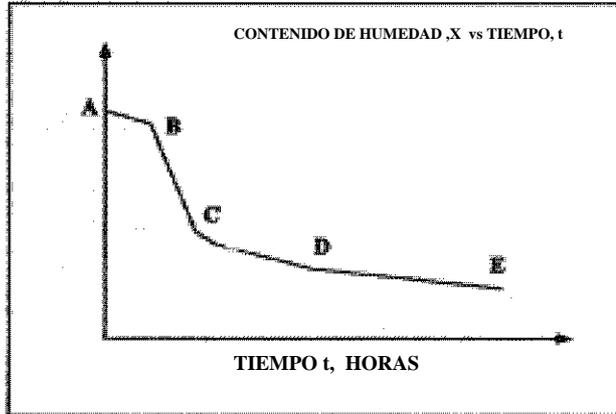


Figura 2.3. Diagramas de secado ⁽⁵⁵⁾

2.- Periodo de velocidad decreciente.

Según se lleva a cabo el proceso de secado, se llega a un punto en el cual el transporte de la humedad a través del material hacia la superficie se reduce y la superficie comienza a secarse y no puede permanecer saturada.

- a) La temperatura de la superficie se incrementa progresivamente hasta alcanzar la temperatura de bulbo seco del aire de secado.
- b) La velocidad de secado se va disminuyendo progresivamente con el proceso de secado.
- c) Comúnmente, este periodo consiste en dos partes, conocidos como el primero y segundo periodos de velocidad decreciente.
- d) Estos periodos representan el mayor tiempo del secado total.
- e) El mecanismo del movimiento de la humedad es causado por movimiento del líquido por capilaridad, difusión líquida resultado de gradientes de concentración, difusión de vapor por gradientes de presiones parciales y difusión en capas líquidas adsorbidas en interfases sólidas.

2.6.3.3. Contenido crítico de humedad

Para poder utilizar las ecuaciones de secado mencionadas en el Apéndice E para los períodos de velocidad decreciente, es necesario conocer el contenido crítico de humedad W_c . Estos valores son difíciles de obtener y solamente es posible determinarlos si se realizan pruebas de secado con sus tiempos correspondientes de secado y resolviendo las ecuaciones. Sin embargo, cuando no es posible realizar pruebas de secado, el contenido crítico de humedad puede ser estimado.

El contenido crítico de humedad corresponde en muy buena estimación, a un valor específico cuando se tiene un cambio significativo en la velocidad de secado, como ocurre cuando se alcanza el final del período de velocidad constante y comienza el período de velocidad decreciente.

Como el contenido crítico de humedad es un valor promedio de la humedad del material, su valor depende de la velocidad de secado, del espesor del material y de factores que tienen influencia sobre el movimiento de la humedad y por consiguiente en el gradiente de humedad resultante. Por lo tanto, el contenido crítico de humedad se incrementa al aumentar la velocidad de secado y el espesor de la cama de material que va a secarse.

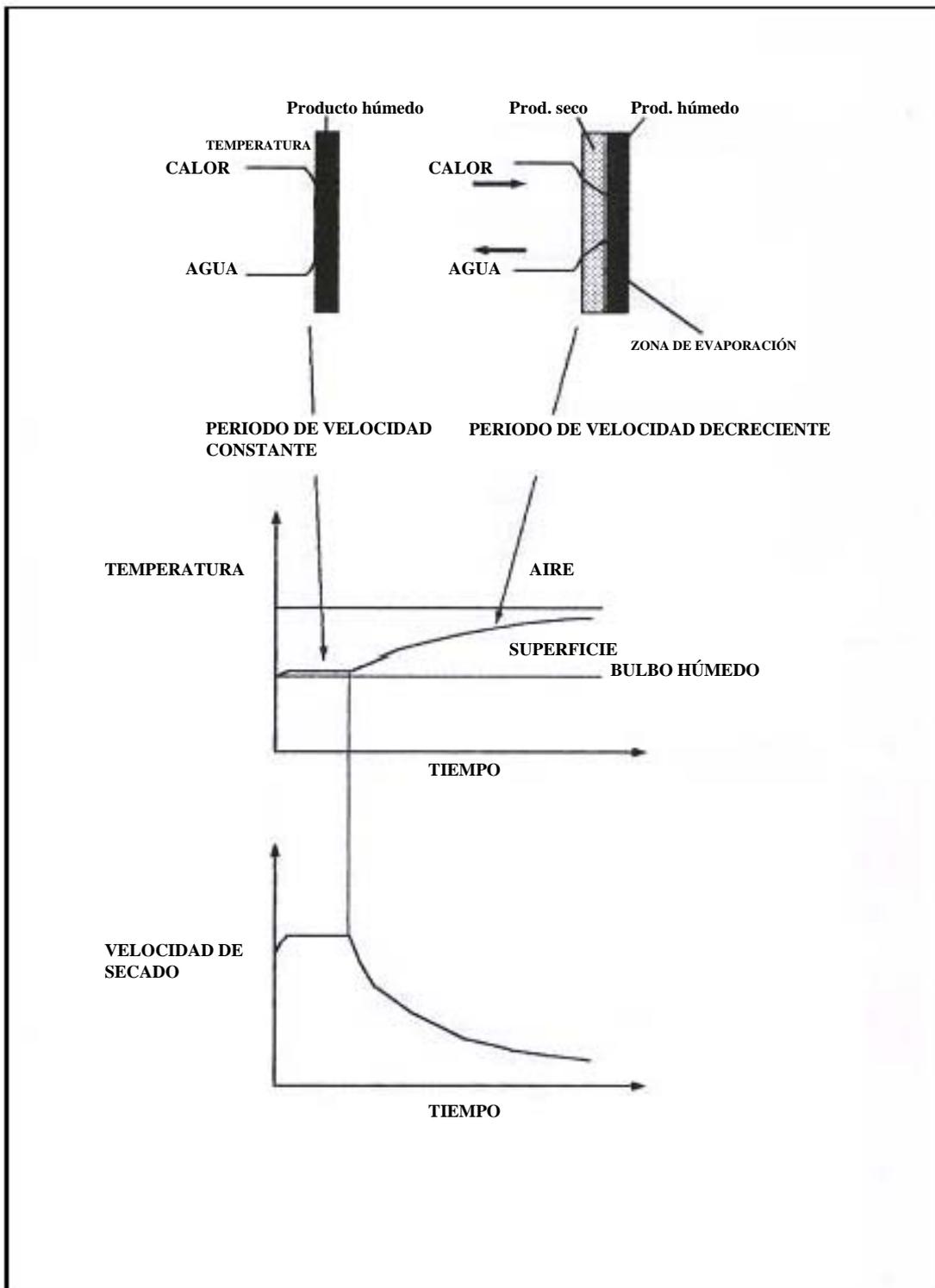


Figura 2.4. Perfiles de temperatura durante el secado ⁽⁵⁵⁾

2.6.3.4. Contenido de humedad en equilibrio

El contenido de humedad en equilibrio se define como el contenido de humedad específico de un material que se encuentra en equilibrio con su ambiente bajo ciertas condiciones. En otras palabras, es el punto en el cual el material ya no absorberá ni perderá humedad; está en equilibrio con su ambiente que se encuentra a ciertas condiciones de humedad y temperatura. El contenido de humedad en equilibrio es importante en secado ya que representa el contenido límite de humedad para ciertas condiciones de temperatura y humedad.

El valor del contenido de humedad en equilibrio, para la mayor parte de los materiales, depende de la dirección como el equilibrio es logrado. Se obtienen diferentes valores si un material húmedo pierde agua en un proceso de desorción, como en el secado, comparado al que se obtiene cuando un material seco gana humedad por adsorción.

2.6.3.5. Secado de alimentos extrudidos tipo “pellets” para botanas

En la producción de “pellets” extrudidos para botanas, las materias primas son usualmente procesadas utilizando una cantidad de humedad considerable (entre 25 y 35%) para poder alcanzar el grado de gelatinización adecuada así como las propiedades reológicas correctas del material gelatinizado. El exceso de humedad del material procesado se remueve de los “pellets” por medio del secado para así evitar los efectos negativos que se pudiesen tener durante el almacenamiento, tal como el desarrollo de microorganismos y otros problemas ya discutidos anteriormente.

Durante el proceso de secado de los “pellets” habría que considerar varios aspectos:

- 1.- La humedad que lleva el “pellet” cuando sale del extrusor formador causa una cierta adherencia de los productos por lo que se pueden formar aglomeraciones de los mismos si no se toman las medidas adecuadas para evitarlo. Es por esto, que la primera fase de secado debe incluir una etapa de vibración y secado.
- 2.- Es muy importante considerar la forma y las dimensiones de cada producto que se ha de secar ya que, por ejemplo, las formas planas presentan un mayor problema de adherirse y requieren de una mayor cantidad de vueltas durante el secado, y si la superficie a secar tiene una altura considerable, las corrientes de aire caliente para secar deben entrar por arriba y debajo de la cama de producto.
- 3.- Es importante preservar el buen aspecto físico de los “pellets” ya que así se evitan deformaciones del producto.
- 4.- La distribución uniforme de la humedad es un aspecto clave para evitar irregularidades durante el proceso de la fritura.

- 5.- Tomar siempre en cuenta algunos cambios fisicoquímicos que puedan afectar los productos, tales como las reacciones de oscurecimiento no enzimático y la retrogradación de los almidones.

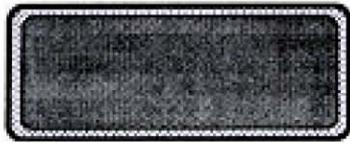
Durante el proceso de secado, los “pellets” progresivamente van perdiendo su contenido de humedad en relación con las variables de secado, siguiendo la cinética del proceso. La cinética del proceso, mejor conocida como la velocidad de secado, depende de la naturaleza del “pellet” principalmente su grado de gelatinización, materias primas, forma y dimensiones. Así mismo, también depende de la humedad final que debe alcanzarse. Al comienzo de la operación de secado, el contenido de humedad del “pellet” es mucho mayor que el contenido de humedad en equilibrio, y está más o menos distribuido uniformemente por lo que la superficie está al principio, todavía húmeda. De esta manera, la estructura es elástica. Esto permite al producto soportar una gran fuerza al manejo (altas temperaturas y humedad relativamente baja del aire de secado) durante el proceso de remoción de humedad. Según va transcurriendo el secado, la velocidad de secado comienza a disminuir debido a que la superficie del “pellet” comienza a secarse creando un gradiente de concentración de humedad entre la superficie y el interior del “pellet”. La temperatura de la superficie se incrementa gradualmente hasta alcanzar la temperatura de bulbo seco del aire de secado. Así mismo, la diferencia entre la humedad del producto y su contenido de humedad en equilibrio se reduce. Si el gradiente de humedad entre la superficie y el corazón del “pellet” es excesivo, las tensiones internas debidas a la presión parcial de vapor, comenzarán a desarrollarse. Estas tensiones se transforman en esfuerzos y, para liberar estos esfuerzos, el “pellet” eventualmente comenzará a formar grietas y se romperá provocando características indeseables en los productos al momento de freírlos (Fig. 2.5 y 2.6).

Para evitar los problemas antes mencionados, es importante que el secador que se use tenga la posibilidad de un buen control de las siguientes variables :

- 1.- Temperatura del aire y humedad relativa. La elección de estas variables es usualmente un compromiso entre las necesidades de un corto tiempo de secado, para poder obtener un máximo rendimiento de la capacidad del secador, y los limitantes de las velocidades de secado. Se obtienen buenos resultados si se divide el secador en diferentes zonas, cada una aislada con sus condiciones específicas de temperaturas y humedades, y cada una controlada independientemente.
- 2.- Ventilación adecuada del aire en términos de velocidad y distribución. La elección del tipo de ventilación de aire afecta la velocidad de transferencia de calor y masa y, por consiguiente, la velocidad de secado y la uniformidad de la distribución de humedad.
- 3.- Movimiento del producto. Aquí debe controlarse el tiempo de residencia, formación de aglomerados y uniformidad en distribución de humedad.



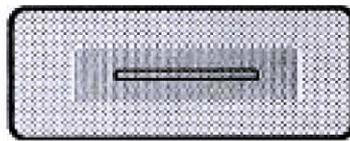
“PELLETS”



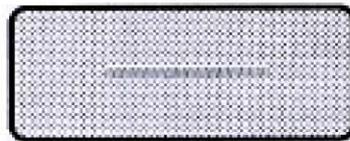
“PELLETS” DESPUES DEL



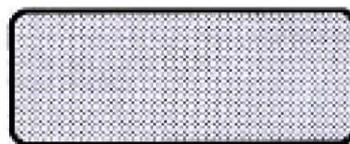
“PELLETS” DENTRO DEL



“PELLETS” DENTRO DEL



“PELLETS” DESPUES DEL



“PELLETS”

Figura 2.5. Mecanismo correcto de secado ⁽⁵⁵⁾



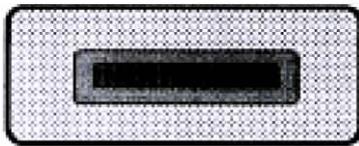
“PELLETS” EXTRUDIDOS



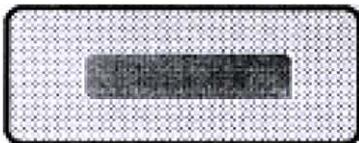
“PELLETS” DESPUES DEL



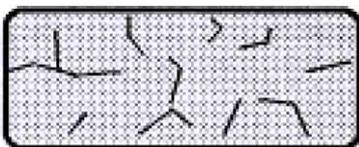
“PELLETS” DENTRO DEL



“PELLETS” DENTRO DEL



“PELLETS” DESPUES DEL



“PELLETS”

Figura 2.6. Mecanismo incorrecto de secado ⁽⁵⁵⁾

2.6.3.6. Tipos de secadores en la elaboración de botanas extrudidas

En el secado de los “pellets” extrudidos, se pueden utilizar diferentes tipos de secadores. Obviamente, las ventajas y desventajas para cada tipo de secador, así como los principios tecnológicos aplicados, tienen que tomarse en amplia consideración antes de realizar la selección definitiva.

1.- Secadores discontinuos ("Batch" en inglés)

Este tipo de secadores son normalmente simples en diseño y construcción, usualmente un tambor rotatorio o unas charolas sobre rieles se colocan en una cámara de secado. Sin embargo, son de capacidad limitada (aproximadamente de 1 a 2 toneladas al día) y requieren de mucha mano de obra, por lo que son más usados en aquellos lugares donde los costos de mano de obra no son muy elevados. Aunque los controles de proceso están más desarrollados, los tiempos de secado son generalmente mayores en comparación con los tiempos de los equipos continuos. Productos planos y frágiles pueden romperse o fracturarse en secadores rotatorios, mientras que, los productos planos y pegajosos pueden presentar problemas de aglomeración en secadores de charolas.

2.- Secadores continuos

Existen diferentes tipos de secadores continuos para los “pellets” de botanas de trigo. Los más comunes son :

- a.- Secadores vibratorios con tiempos de residencia cortos (“trabato”, nombre italiano dado por el fabricante a este tipo de secador)⁽⁵⁵⁾ : Estos tipos de secadores están usualmente construidos de bandas paralelas, una encima de otra, moviéndose en sentidos opuestos. Esta rápida oscilación permite al producto tener movimiento continuo por medio de vibración, evitando así el contacto prolongado en el mismo punto entre los “pellets”. Aire caliente a alta velocidad es recirculado entre el producto que va vibrando y moviéndose rápidamente a fin de remover el contenido de humedad superficial, evitando así el problema de adherencia entre los “pellets”. Este tipo de secadores, que se entiende a veces en el proceso como un equipo de presecado, es ideal para productos pegajosos así como para aquellos que presentan este problema a altas humedades. En este último caso, los productos se someten posteriormente a otra etapa de secado con el equipo apropiado.

- b.- Secadores de bandas: Existen varias versiones para este tipo de secadores. Sin embargo, todos tienen como rasgo común, que están contruidos con una serie de bandas porosas que transportan el producto y permiten que el aire caliente sea recirculado a través de la cama de producto. Todos tienen un punto de entrada o carga del producto y un punto de salida o descarga, así como puntos de ventilación que permiten el control y extracción de la humedad del aire.

Las bandas pueden ser de acero inoxidable o de algún polímero especial que resistan condiciones de altas temperaturas y condiciones extremas de humedades relativas. Estas bandas generalmente van soportadas y desplazadas por cadenas conectadas a un motor que puede tener velocidad variable para los requerimientos de diferentes tiempos de residencia en los procesos de secado de “pellets”. El hecho de estar una encima de otra, de forma paralela, minimiza los requerimientos de espacio. La distancia que existe entre bandas puede ser variable dependiendo del espesor de la cama o lecho de producto y del tipo del mismo. Estas diferentes distancias entre bandas pueden variar en todo el conjunto o bien pueden variar por grupos, todo depende del número de bandas, del tipo de ventilación que se requiera y del tipo de proceso, ya sea que se quiera crear zonas de secado de control independiente y variable o no. El aire se calienta gracias a intercambiadores de calor adecuados al proceso, en donde el vapor de agua o aceite térmico pueden ser utilizados como fluido calefactor.

Este aire caliente se mantiene en recirculación dentro del secador por medio de ventiladores. El tipo de ventiladores que se eligen depende de la dirección de flujo de aire, la velocidad del mismo y del volumen de aire a manejar, lo que viene a determinar los coeficientes de transferencia de masa y de calor. El producto que entra en el secador por su punto de carga, es distribuido uniformemente sobre la banda, ya sea por un canal de alimentación que tiene un movimiento hacia un lado y otro de la banda, o bien a través de una tolva vibratoria. Parte de la humedad del aire se extrae a través de mirillas de ventilación controladas por válvulas automáticas que dan un control preciso de la humedad relativa para cada zona del secador y en ocasiones una parte es recirculada a través de los intercambiadores de calor para recobrar parte de la energía. Los “pellets” ya secos son descargados hacia una banda de enfriamiento para poder llevar el producto hacia condiciones ambientales de temperatura.

El control de todos los factores o variables, y por ende el control del proceso de secado, se lleva a cabo desde un tablero de manera automática y muy precisa.

La construcción de estos secadores se realiza con una ingeniería que permite asegurar prácticamente un perfecto aislamiento en el secado, ya que generalmente se utilizan poliuretanos patentados colocados en capas en la construcción de los paneles o paredes y que aíslan perfectamente y evitan la condensación de la humedad en el interior de las paredes, sobre todo en aquellas zonas de altas humedades. Además, estos paneles pueden ser abiertos y cerrados muy fácilmente lo que permite tener un muy buen acceso al interior del secador para el mantenimiento de los rieles de las bandas y de sus sistemas de tensión de las mismas, así como de los ventiladores, los intercambiadores de calor y para la lubricación de las cadenas. Para garantizar que los paneles queden perfectamente sellados al momento de cerrarlos, se tienen sellos instalados por todos los bordes de las puertas. Todas las partes que llegan a estar en contacto con el producto, están construidas con materiales que deben estar bajo las normas reguladoras internacionales tales como las de la FDA de los EEUA.

El secado de los “pellets” del presente proyecto consta de varias etapas. La primera es una etapa de secado con vibración en un secador que se le llama “trabato”. Posteriormente, el producto entrará al presecador, en donde se someterá a una temperatura menor que la etapa anterior y, finalmente, entrará al secador donde el producto se someterá a un secado más lento. En las figuras 2.7 y 2.8 se representa un diagrama de secado en los equipos de presecado y posteriormente en el secado.

2.6.4. La fritura de botanas extrudidas

El proceso de fritura es el último paso, junto con el posterior sazonado, en la elaboración de las botanas fabricadas con el proceso de *extrusión*. Este paso es el que proporciona grandes cambios físicos y sensoriales del producto, por lo que la manipulación de esta etapa de procesamiento es determinante en las características finales que se quieran de los productos a consumir. Aquí es importante considerar, tanto los cambios y comportamiento que tiene el aceite durante la fritura, como el comportamiento y cambios del producto mismo.

2.6.4.1. Comportamiento de los aceites de fritura ⁽²³⁾

Durante la fritura se producen en el aceite los siguientes tipos de compuestos (Figura 2.9):

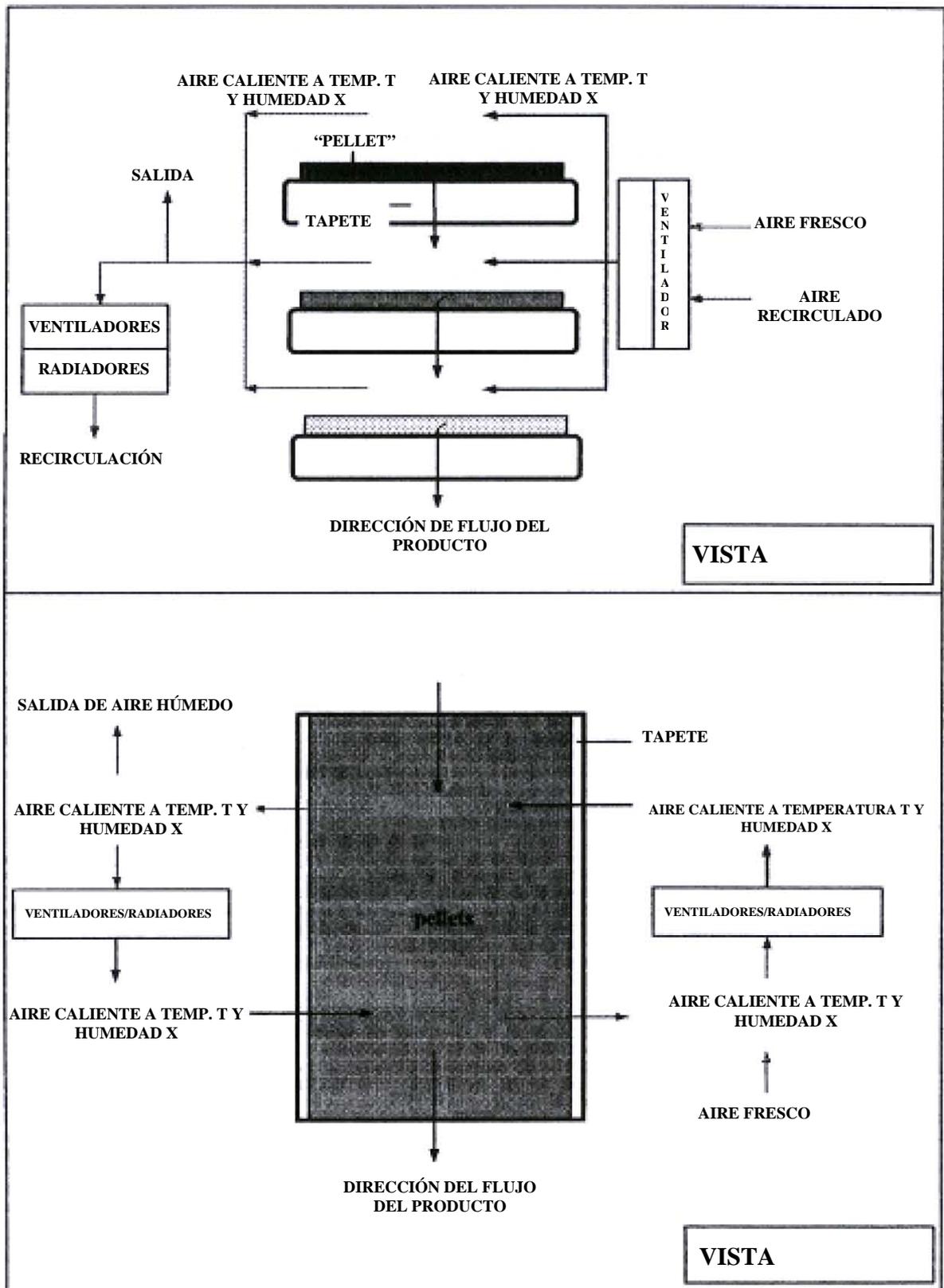


Figura 2.7. Diagrama de presecado ⁽⁵⁵⁾

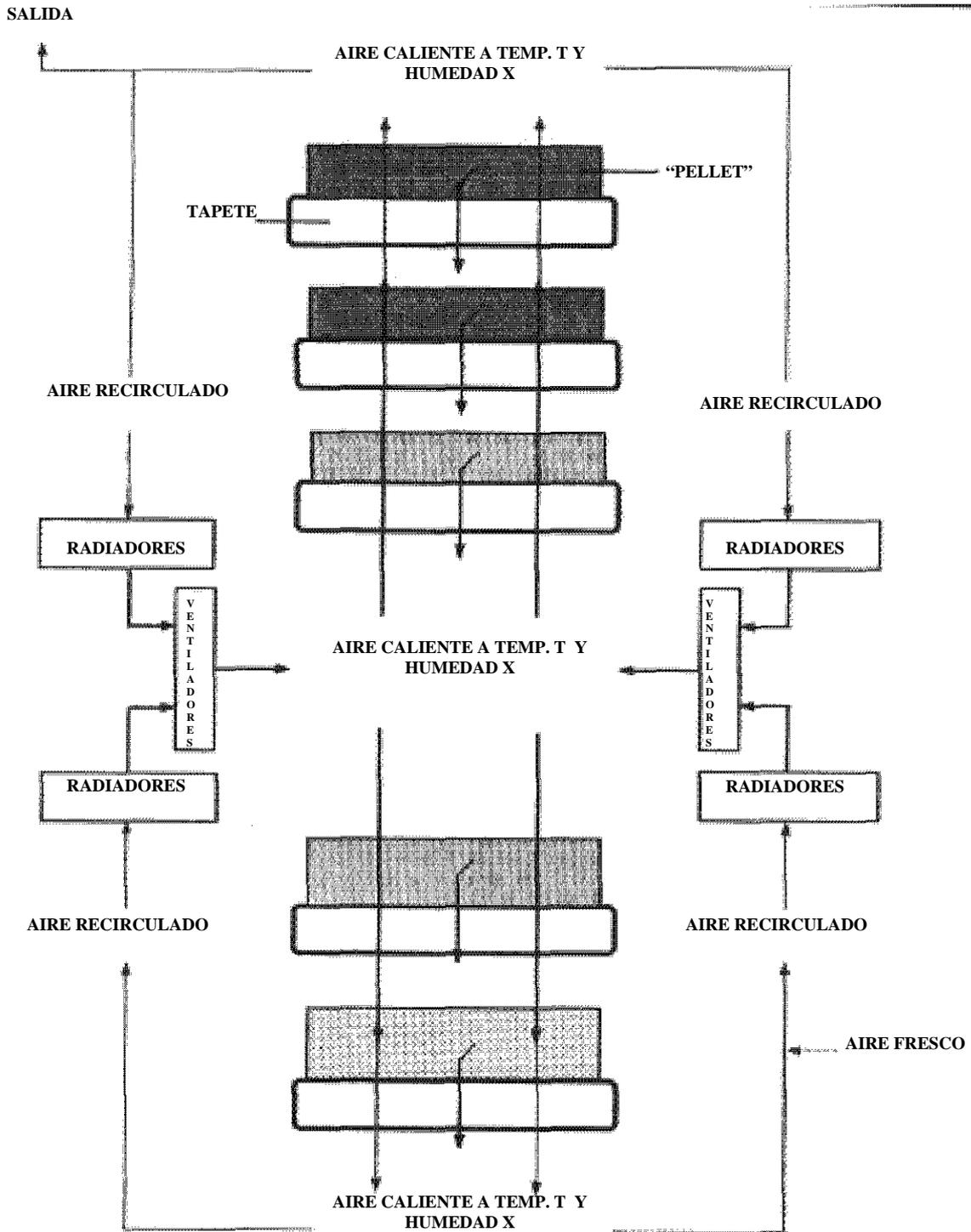


Figura 2.8. Diagrama de secado⁽⁵⁵⁾
 2.6.4. La fritura de botanas extrudidas

VISTA

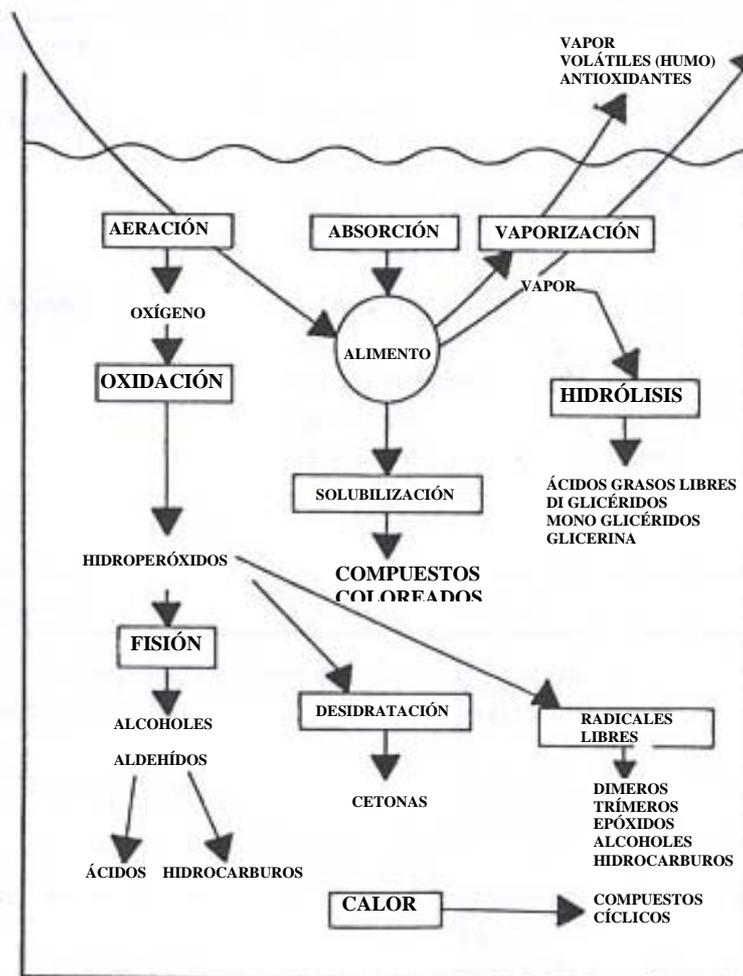


Figura 2.9. Cambios en el aceite de la fritura ⁽⁵⁵⁾

Volátiles: En la fritura, las reacciones de oxidación existentes hacen que se formen los hidroperóxidos, que se descomponen dando lugar a la aparición de aldehídos saturados e insaturados, cetonas, hidrocarburos, lactonas, alcoholes, ácidos y ésteres. Después de 30 minutos de calentamiento a 180°C al aire, ya se tienen los productos volátiles primarios de oxidación. Éstos varían dependiendo del tipo de aceite, del alimento y del tratamiento térmico, aunque la mayoría de los compuestos volátiles son: hexanal, heptanal, octenal, decadienal, octano, undecano, pentilfurano, pentadecano.

Compuestos polares no poliméricos de volatilidad moderada (por ej., hidroxí y epoxiácidos): Estos compuestos se producen según los diversos patrones de oxidación que implican al radical alcoxi.

Ácidos diméricos y poliméricos y glicéridos diméricos y poliméricos: Estos compuestos se producen mediante combinaciones de radicales libres a partir de reacciones térmicas y oxidativas. La polimerización hace que aumente sustancialmente la viscosidad de los aceites de fritura.

Ácidos grasos libres: Estos compuestos se producen en la hidrólisis de los triacilglicerolos en presencia de agua y calor. Estas reacciones son las responsables de los diferentes cambios físicos y químicos observados en el aceite a lo largo de la fritura, entre los que se incluyen aumentos en la viscosidad y en el contenido de ácidos grasos libres, el desarrollo de colores oscuros, la disminución del índice de refracción, la disminución de la tensión superficial y el aumento de la tendencia del aceite a formar espuma.

2.6.4.2. Comportamiento del alimento en la fritura ⁽²³⁾

El alimento a lo largo de la fritura experimenta los siguientes procesos:

El agua se va liberando continuamente del alimento en el aceite caliente, dando lugar a un efecto de destilación en corriente de vapor que arrastra los productos de oxidación volátiles del aceite (Figura 2.9).

El agua liberada agita el aceite y acelera la hidrólisis, dando lugar a un incremento en la cantidad de ácidos grasos libres. La nube de vapor formada por encima del aceite puede reducir el oxígeno disponible para la oxidación. Esta agua que se libera como vapor del alimento es lo que provoca la expansión del “pellet” aumentando considerablemente su volumen y dándole características porosas.

Durante la fritura, los compuestos volátiles (compuestos azufrados y derivados de la pirazina existentes en las papas, en el caso de botanas fabricadas con harina de papa) pueden desarrollarse en el alimento por sí mismo o por la interacción entre el alimento y el aceite.

Los alimentos absorben cantidades variables de aceite en las freidoras lo que hace que se tenga que añadir aceite fresco continuamente. Cuando se dispone de un sistema de freidoras de tipo continuo las condiciones de equilibrio en las propiedades del aceite se alcanzan rápidamente.

2.6.4.3. Cambios químicos y físicos ⁽²³⁾

Durante el proceso de fritura se producen diversos cambios físicos y químicos, tanto en el aceite como en el alimento, aunque estos no deben tomarse como signo de deterioro indeseable o perjudicial. De hecho en botanas extrudidas, estos cambios son deseados en el proceso de fritura del “pellet” ya que va a proporcionar las cualidades deseadas para la botana final, adquiriendo la botana textura en su superficie y en su interior (que sea crujiente), color, aroma y “bouquet” característicos. Sin embargo, un descontrol en el proceso de fritura puede ocasionar daños importantes en las cualidades físicas y sensoriales del alimento.

Los cambios físicos y químicos producidos en la fritura están influidos por un gran número de variables y los compuestos formados dependen tanto de la composición del aceite como del alimento a freír. Las temperaturas muy altas, los tiempos de fritura largos, la presencia de contaminantes metálicos, favorecen una mayor descomposición del aceite y un producto frito no deseable. Es importante considerar el diseño y tipo de freidora (ya sea que se trate de sartén, freidora discontinua o continua), ya que cuanto mayor sea la relación superficie – volumen, más rápidamente se oxidará el aceite. Otros factores que influyen también son la velocidad de renovación de aceite, la forma del calentamiento (continuo o intermitente) y la presencia de antioxidantes. El tipo de aceite utilizado en la fritura, el historial térmico del aceite, el tiempo de uso, la temperatura, el tiempo de fritura, el tamaño y las características superficiales del alimento, son factores claves que influyen en la cantidad de aceite que el alimento retiene. Este aceite retenido es muy importante al momento de considerar la calidad y características finales deseables en las botanas.

2.6.4.4. Medidas de control

Económicamente es muy importante maximizar la vida útil de los aceites de fritura. Existen algunas medidas importantes a tomar en consideración, a fin de evitar una descomposición excesiva del aceite por oxidación, por el desarrollo de aromas desagradables o la formación de cantidades grandes de compuestos poliméricos o cíclicos. Estas medidas son:

- 1.- Elección de un aceite de fritura de buena calidad y estabilidad.
- 2.- Uso de un equipo apropiado.

- 3.- Selección de la temperatura adecuada para la fabricación del alimento frito; en este estudio, la temperatura ideal para freír los “pellets”.
- 4.- Filtrado frecuente del aceite para eliminar las partículas del alimento.
- 5.- Vaciado y limpieza frecuentes del equipo.
- 6.- Reemplazamiento frecuente del aceite para mantener una alta calidad de los productos fritos.
- 7.- Consideración del uso de antioxidantes.
- 8.- Adecuada preparación del personal.
- 9.- Análisis físicos y químicos del aceite.

CAPÍTULO 3

Materiales y métodos

3.1 Estudio a nivel de laboratorio

3.1.1. Materiales y condiciones de extrusión

Se utilizó un extrusor de la marca *Wenger*, modelo X-5, ubicado en la planta piloto del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, el cual se adaptó en las condiciones establecidas para este estudio e instrumentó para su funcionamiento. Las harinas se extrudieron a las siguientes temperaturas:

- Extrusor de cocimiento:

- Zona de alimentación 75-80°C
- Zona de amasado 80-85°C
- Zona de cocimiento 90-95°C

- Extrusor de formación:

Zona de formado 60-65°C

Posteriormente, los productos obtenidos se secaron en una estufa con charolas *Apex* HD tipo 48BF con aire a 50°C por 8 horas, se cortaron y se envasaron en frascos de vidrio para su evaluación posterior.

Se obtuvieron productos elaborados a partir de diferentes condiciones de:

-humedad inicial de la mezcla de ingredientes: 30, 33 y 35%

-velocidad del tornillo del extrusor: 600, 900 y 1200 rpm

A fin de encontrar las condiciones óptimas en las cuales se podía trabajar el extrusor *Wenger* del laboratorio, se utilizó una mezcla que contenía harina de

trigo de una marca comercial con las condiciones variables antes mencionadas y utilizando 15% de almidón en la mezcla. Así se encontró que las condiciones óptimas para trabajar el extrusor en particular eran de 35% de humedad y 600 rpm.

Una vez encontradas las condiciones óptimas para el extrusor, se procedió a trabajar tres diferentes tipos de harina, además de la comercial, clasificadas o conocidas por su uso industrial como:

- harina panadera
- harina pastelera (Saratoga)
- harina galletera (Yoreda)

Se realizaron variaciones en la formulación del contenido de almidón de maíz (0.0, 7.5, 15.0, 25.0%), para las cuatro harinas.

Estas variaciones en el contenido de almidón en la formulación se trabajaron con base en las condiciones consideradas como las mejores para trabajar específicamente en el extrusor del laboratorio y definidas con anterioridad como 35% de humedad y 600 rpm.

3.1.2. Metodología

3.1.2.1. Clasificación de las harinas e identificación de los productos

Las muestras obtenidas se clasificaron e identificaron para su estudio como se muestra en la Tabla 3.1.

Primeramente, se realizó un análisis sobre la procedencia de las muestras, considerando el tipo de harina utilizado en su formulación. Se clasificaron las harinas de acuerdo a su calidad panadera, empleando la metodología presentada en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Codificación de las muestras utilizadas

MUESTRA	HARINA	VELOCIDAD DE ROTACIÓN rpm	% HUMEDAD	% ALMIDÓN
COM1	COMERCIAL	600	30	15
COM2	COMERCIAL	600	33	15
COM3	COMERCIAL	600	35	0
COM4	COMERCIAL	600	35	7.5
COM5	COMERCIAL	600	35	15
COM6	COMERCIAL	600	35	25
COM7	COMERCIAL	900	30	15
COM8	COMERCIAL	900	33	15
COM9	COMERCIAL	900	35	15
COM10	COMERCIAL	1200	30	15
COM11	COMERCIAL	1200	33	15
COM12	COMERCIAL	1200	35	15
GAL1	GALLETERA	600	35	0
GAL2	GALLETERA	600	35	7.5
GAL3	GALLETERA	600	35	15
GAL4	GALLETERA	600	35	25
PAN1	PANADERA	600	35	0
PAN2	PANADERA	600	35	7.5
PAN3	PANADERA	600	35	15
PAN4	PANADERA	600	35	25
PAS1	PASTELERA	600	35	0
PAS2	PASTELERA	600	35	7.5
PAS3	PASTELERA	600	35	15
PAS4	PASTELERA	600	35	25

3.1.2.2. Calidad panadera y análisis proximal de las harinas y los productos extrudidos

La determinación de la calidad panadera de las harinas se realizó en la Compañía Harinera de México, con las determinaciones de cenizas, humedad, proteína y parámetros obtenidos mediante alveogramas ⁽¹¹⁾.

En el alveógrafo se preparó primeramente una masa que se corta en plastones redondos de diámetro y grosor constante para luego insuflar aire a presión constante en el plastón. A un cierto nivel de presión el plastón comienza a desarrollar un globo. El manómetro registrador del alveógrafo imprime las

variaciones de la presión de aire dentro de la burbuja, hasta que se rompe. Así, el alveograma dará los datos de tenacidad, extensibilidad, la relación P/ G y W. (El Apéndice B reporta los datos de las especificaciones de las harinas utilizadas). Para obtener información acerca de la procedencia de las harinas y de sus características se realizó un análisis proximal de las mismas.

Los análisis químicos se realizaron de acuerdo a las metodologías aprobadas por la AOAC ⁽⁴⁾, las cuales se describen prolijamente en el Apéndice A y éstos fueron:

- A.1. Determinación de humedad
- A.2. Determinación de cenizas
- A.3. Determinación de proteína cruda
- A.4. Determinación de extracto etéreo o grasa cruda
- A.5. Determinación de fibra cruda
- A.6. Determinación de carbohidratos asimilables

Para los productos extrudidos se tomó un total de 25 muestras diferentes y se evaluaron por medio de pruebas fisicoquímicas y una evaluación sensorial, aplicando las siguientes determinaciones.

3.1.2.3. Pruebas fisicoquímicas y de textura para productos extrudidos

Se realizaron 4 determinaciones para cada muestra.

1. Determinación de humedad

Se determinó el contenido de humedad de los productos antes y después de freírlos (180°C de 12 a 15 segundos) en una termobalanza O'Haus HB 200 por triplicado. Se tomaron 10 g de muestra previamente molida y homogeneizada y se sometieron a una temperatura de 140°C por 30 minutos.

2. Determinación del grado de expansión

Se tomó una muestra representativa del producto y se determinó el diámetro de cada "pellet" con un calibrador Vernier antes y después de freír (por triplicado), determinándose el diámetro promedio del "pellet" y de la fritura para determinar el grado de expansión por medio de la siguiente relación:

GRADO DE EXPANSIÓN = Diámetro promedio de la fritura - Diámetro promedio del "pellet".

3. Determinación del grado de absorción de aceite

Se realizó un balance de materia para obtener una relación del aceite absorbido por el producto después de freírlo. Se pesaron 10 g de una muestra representativa, previamente homogeneizada, se llevó a cabo el proceso de freído y se pesaron las frituras obtenidas, se determinó la cantidad de agua perdida en el proceso de fritura por medio de una determinación de humedad y se determinó el grado de absorción de aceite (por triplicado) por medio del siguiente balance de materia:

Materia sólida del "pellet" + humedad del "pellet" = Xg "pellet"

Materia sólida del "pellet" - humedad "pellet" = Xg "pellet"

Materia sólida fritura + aceite abs. + humedad fritura = Yg fritura

Agua perdida = humedad "pellet" - humedad fritura

ACEITE ABSORBIDO = Yg + Agua perdida - Xg

4. Evaluación de la textura

Para evaluar la textura del producto se utilizó un Texturómetro *Brabender Struct-o-graph* con un punzón de 60° y una fuerza de compresión de 5 newtons (N) ⁽⁶⁶⁾. Se determinó el coeficiente de fractura (Cf) en una muestra representativa de cada producto (por triplicado) de acuerdo con la siguiente relación:

$$Cf = (F.t.r^2) / (m.d) \quad (3-1)$$

donde:

Cf = coeficiente de fractura del producto (adimensional)

F = fuerza de compresión del texturómetro

d = diámetro promedio del producto

m = masa promedio del producto

t_r = tiempo de relajación (tiempo que tarda el punzón en fracturar el producto)

En las determinaciones de textura se obtenían gráficas para cada producto con el texturómetro *Brabender Struct-o-Graph* . Una gráfica típica del texturómetro se muestra en la Figura 3.1.

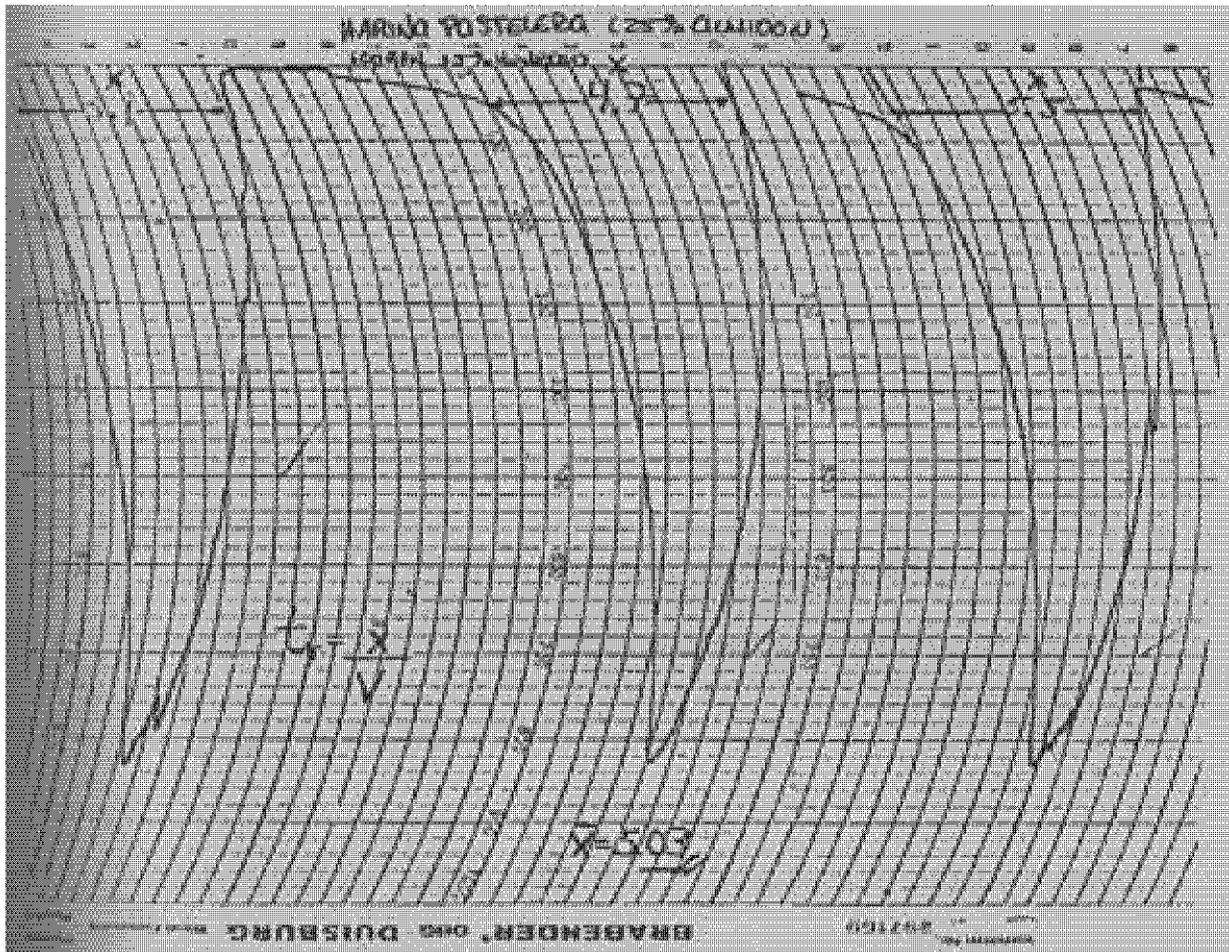


Figura 3.1. Gráfica típica del texturómetro *Brabender*

Para evaluar los productos se relacionaron las 4 variables fisicoquímicas utilizadas y para el análisis estadístico de datos se aplicó un modelo de superficie de respuesta como el desarrollado por Artz, W.E. ⁽⁵⁾, por medio de un programa de computadora (Statgraphics) para obtener un tipo de respuesta polinomial del tipo:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_{1A2} + b_{22}X_{2A2} + b_{12}X_1X_2 + e \quad (3.2)$$

En esta ecuación

Y = respuesta
X₁ = revoluciones por minuto
X₂ = humedad de la muestra
e = error experimental

Esto permite determinar la influencia de cada condición de operación de respuesta.

En el programa, además de realizar la regresión, se hizo un análisis estadístico completo, obteniéndose la regresión polinomial, los coeficientes de regresión para cada variable independiente y el error estándar, además del análisis de varianza (ANDEVA) ⁽⁶⁶⁾.

3.1.2.4. Evaluación sensorial

La evaluación sensorial tuvo como finalidad encontrar el tipo de harina más adecuada para la elaboración de los productos y determinar cuál de las variaciones de almidón en la formulación reflejaba un mejor producto que fuese más aceptable por el consumidor. Para lo anterior se realizó una evaluación preliminar en la cual se seleccionaron las muestras que participaron en los análisis ^(41, 42,56).

La evaluación sensorial se llevó a cabo de acuerdo al esquema de trabajo mostrado en la Figura 3.2.

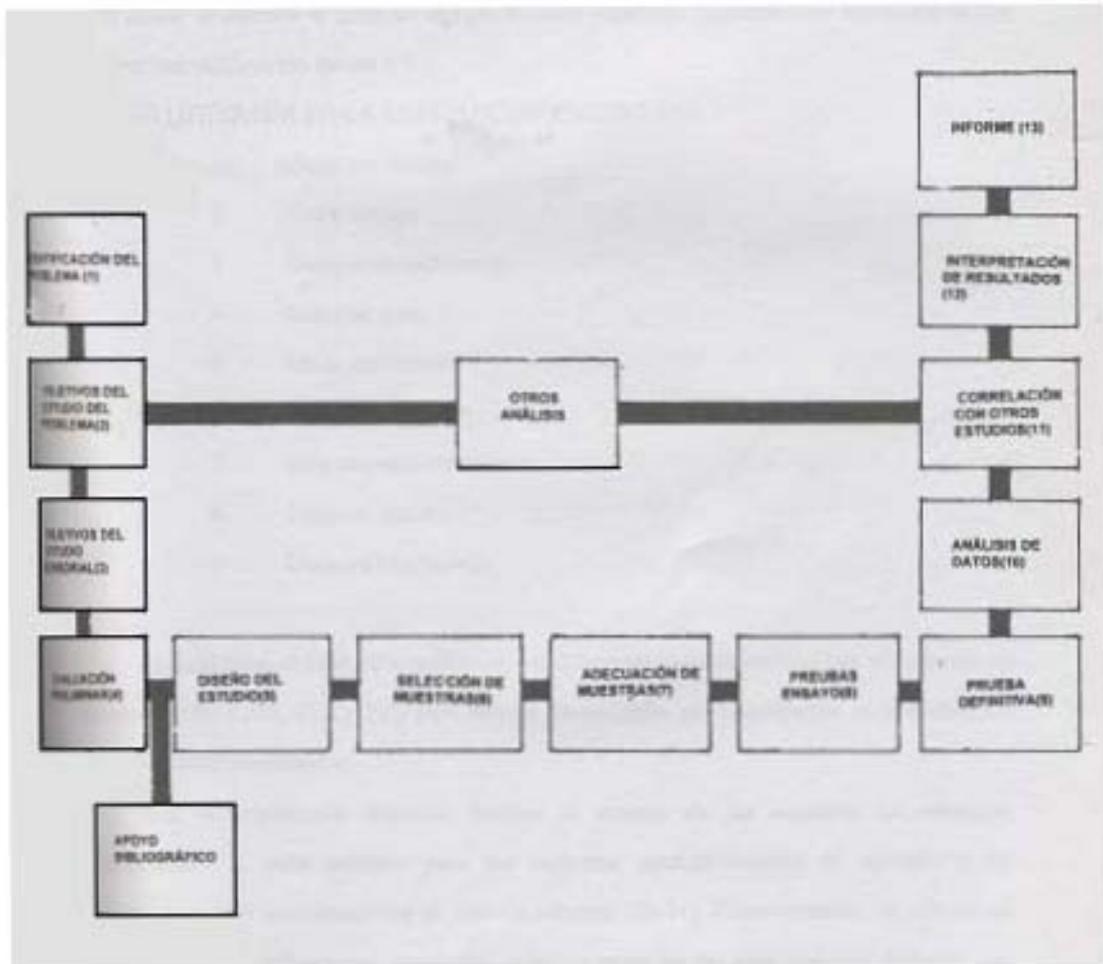


Figura 3.2. Esquema tradicional de trabajo para una evaluación sensorial ⁽⁵⁶⁾

3.1.2.4.1. Evaluación preliminar de los productos extrudidos

Esta evaluación se llevó a cabo por medio de una escala hedónica estructurada (del 1 al 9) en donde se calificó el nivel de agrado de cada producto, descartándose las muestras que tuvieron una calificación mayor a 7. La escala utilizada en la evaluación preliminar fue:

1. Gusta muchísimo
2. Gusta mucho
3. Gusta moderadamente
4. Gusta un poco
5. Me es indiferente
6. Disgusta un poco

7. Disgusta moderadamente
8. Disgusta mucho
9. Disgusta muchísimo

Se analizaron el total de muestras de los diferentes tipos de harinas con variaciones en la formulación de almidón de 0%, 7.5%, 15%, y 25% para obtener las que participarían en la evaluación sensorial a nivel consumidores. Con la experiencia obtenida durante el manejo de las muestras se otorgaron calificaciones a cada una para los atributos predeterminados de acuerdo a las características más representativas de estos productos ^(70,72). Posteriormente se obtuvo un promedio de las calificaciones otorgadas, seleccionando así las que tuvieron una calificación promedio igual o mayor a 7. Las muestras seleccionadas se codificaron como se menciona en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Codificación de las muestras seleccionadas de la evaluación preliminar

MUESTRA	CALIFICACION	CLAVE
COM6	8	392
GAL4	7	485
PAN4	8	743
PAS4	9	321

Con las muestras mencionadas en la Tabla 3.2, se realizó la evaluación sensorial para conocer el nivel de agrado de cada producto. Los resultados obtenidos se analizaron por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) y tomando en cuenta la desviación estándar para conocer la discrepancia de los consumidores respecto a dicha opinión ^(50, 51), para determinar cuáles de las harinas son diferentes entre sí, se calculó la diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) y se plantearon las siguientes hipótesis:

Ho: Las harinas comercial, galletera, panadera y pastelera son iguales entre sí.

Ha: Las harinas comercial, galletera, panadera y pastelera son diferentes entre sí.

De acuerdo con las hipótesis planteadas:

Ho: M1 = M2 = M3 = M4

Ha: M1 ≠ M2 ≠ M3 ≠ M4

Aquí se pretendió observar si existía una diferencia significativa entre los 4 tipos de harinas empleadas en la elaboración de los productos.

3.1.2.4.2. Evaluación sensorial con consumidores

Para evaluar la aceptación de los productos seleccionados se realizó una prueba de nivel de agrado con una escala hedónica no estructurada con consumidores universitarios (entre 18 y 23 años) de ambos sexos. Para obtener confiabilidad en los resultados se evaluó una población de 150 jueces no entrenados (consumidores).

En los cuestionarios realizados se formuló la pregunta "¿Por qué calificó así al producto?", con lo cual se pretendió conocer los atributos sensoriales más importantes del producto para la posterior realización de un estudio sensorial analítico que requiere el entrenamiento de jueces⁽⁵⁶⁾.

A continuación se muestra el formato del cuestionario utilizado en la evaluación sensorial.

Nombre: _____ Fecha: _____ Serie: _____

Instrucciones:

Pruebe las siguientes muestras e indique con una "x" su nivel de agrado de acuerdo a la escala que se presenta a continuación:

Muestra

392 ---Gusta-----Indiferente-----Disgusta---

485 ---Gusta-----Indiferente-----Disgusta---

743 ---Gusta-----Indiferente-----Disgusta---

321 ---Gusta-----Indiferente-----Disgusta---

¿Cuál es la muestra que le gusta más? ¿Por qué? _____

3.2. Aplicación del proyecto en la industria

3.2.1. Metodología de selección y seguimiento de la supervisión del montaje y arranque de una planta industrial de extrusión

3.2.1.1. Selección

El montaje de una planta de ***extrusión*** contempla varios aspectos muy complejos. El primero a considerar es la realización de todo un estudio de los equipos necesarios para la instalación de la planta. Recaudar información mediante una investigación acerca de los equipos y sus fabricantes, fue el primer paso a realizar. Así, una vez hecho un estudio previo de mercado mediante el cual se puede contemplar la cantidad de producto que se puede introducir a la venta, se decide la capacidad de los equipos que se emplearán en la planta. Por supuesto, un factor limitante y determinante en el momento de tomar decisiones es tomar en consideración los recursos económicos que se tienen para llevar a cabo el proyecto.

Seguido a esta investigación, se llevaron a cabo entrevistas con diferentes fabricantes a fin de conocer las ventajas, el funcionamiento y las bondades de sus equipos.

Posteriormente, contando ya con los datos necesarios, se realizó un análisis comparativo de los puntos que cada fabricante resaltaba como ventajas y cualidades de sus propios equipos. Para este análisis se subdividió el proceso en 4 partes: Mezclado de material seco, cocción, formado y secado.

Una vez hecho el análisis de los diferentes equipos que se ofrecen en el mercado, se decidió cuáles eran los equipos más adecuados para los fines que se perseguían en particular. Así, se procedió a planear con detalle la instalación de la planta, con los equipos que se eligieron con anterioridad, para lo cual se procedió a realizar toda una serie de planos y cálculos, como son el “Layout” (distribución de la planta en general), los cálculos y planos eléctricos, neumáticos, hidráulicos y, en general, de todos los servicios auxiliares.

Se contempló pues, la instalación de calderas, de equipos de transporte, de intercambiadores, de una subestación eléctrica, etc.

Se planearon los espacios óptimos con base al local disponible, a fin de aprovechar al máximo el lugar y permitir un funcionamiento apropiado de la planta en cuanto a sus lugares de almacenaje de materia prima y producto terminado, de producción, de oficinas, laboratorio de control de calidad, áreas de taller mecánico, sanitarios, comedor, entre otras.

Toda esta planeación y desarrollo se llevó a cabo con la participación de expertos en diferentes áreas, como ingenieros mecánicos, civiles, técnicos en mecánica, eléctricos y la parte química, para el desarrollo del producto se apoyó en los resultados preliminares del presente trabajo. La selección también contempla el personal que se va a necesitar para operar la planta.

3.2.1.2. Montaje

Una vez efectuada la selección y planeación de la planta, se procedió al montaje. Lo primero a realizar cuando llegan los equipos adquiridos a la planta, es revisar lo que llegó para cerciorarse que todo esté completo y correcto.

Los fabricantes incluyen planos así como instrucciones precisas para el armado y montaje de los equipos, por lo que se supervisa el buen trabajo de los mecánicos y gente que se encargará del trabajo, cerciorándose que se lleve a cabo el armado correcto, verificando (“checando”) tolerancias, que todo esté bien nivelado, bien apretado y que se realice el montaje correcto.

Al momento del montaje hay que considerar trayectorias de tuberías y del cableado eléctrico. Así mismo, los equipos deben ser instalados de tal forma que se faciliten las labores de mantenimiento y limpieza.

La instrumentación adecuada de los equipos es un aspecto fundamental para el control de variables del proceso. Válvulas de seguridad, neumáticas, llaves, sensores de temperatura, de presión, reguladores, sensores de humedad, filtros, alarmas, etc., deben tomarse en cuenta en el montaje de todos los equipos de la planta.

Un punto fundamental para el montaje adecuado de la planta es contar con un taller mecánico y la herramienta indispensable y necesaria para realizar el trabajo.

Contemplar reglas de seguridad es fundamental para evitar problemas y que se lleve a cabo el montaje exitosamente. Así mismo, la limpieza en todo trabajo es muy importante para dejar todo listo para el arranque.

Los materiales utilizados, tanto en la construcción de la obra civil así como de tuberías, transportes, equipos, accesorios y manejo en general del producto debe tomar en cuenta que se trata de un producto alimenticio y que por lo mismo, su producción y manejo deben ser especiales e higiénicas.

3.2.1.3. Arranque

Una vez realizado el montaje de la planta, se debe revisar que todo funcione bien. Todos los instrumentos de medición y control deben estar calibrados, todos los sistemas de seguridad deben ser probados. Las alarmas deben funcionar perfectamente así como todas las válvulas de seguridad.

La materia prima debe estar lista. Las mezclas y formulaciones deben estar ya preparadas y su suministro y transporte ya probadas.

Se procede pues al arranque. Todos los servicios deben estar listos, agua, aire, electricidad, gas, etc. Se prenden motores y se verifican las revoluciones de los sinfines.

Se comienza por encender la caldera, los sistemas de calefacción y de enfriamiento.

Se arranca el mezclador, al cual se le suministra la mezcla de materias primas

El extrusor cocedor y el formador ya han sido previamente engrasados (con grasa comestible) y el suministro a los mismos de aceite térmico, vapor o agua de enfriamiento para el control de temperaturas deben estar listos.

Después de que la masa está cocida en la primera etapa de *extrusión*, se procede al formado, teniendo especial cuidado en la temperatura y velocidad del tornillo que juegan un papel muy importante para el formado y corte del producto.

El paso siguiente, el secado, será determinante. Los secadores deberán estar listos en sus temperaturas, para lo cual los ventiladores y radiadores ya han sido revisados y puestos en marcha. Todos los motores se revisan que den la velocidad apropiada a las bandas transportadoras para los tiempos de secado.

El producto tardará varias horas en salir y, después del secado, todavía ha de estabilizarse antes de poder someterse a la fritura, para poder evaluar el producto final obtenido.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Análisis proximal de las harinas

La clasificación de las harinas empleadas en este estudio, con base en su calidad panadera, se determinó mediante las especificaciones de las harinas en cuanto a sus características y los datos obtenidos de los alveogramas (tenacidad, extensibilidad, factor P/G, etc.), que se obtuvieron con la ayuda de las compañías harineras (Apéndice B). Así, en las Tablas 4.1 a 4.3 se muestran los resultados obtenidos del análisis proximal de las harinas (en bases húmeda y seca), empleadas para la elaboración de los productos, así como de su caracterización panadera. Al realizar el análisis proximal se observó que la composición química de las harinas es muy similar, aunque presentan menor cantidad de proteínas las harinas pastelera y galletera, lo que era de esperarse de acuerdo con las especificaciones proporcionadas por las industrias harineras (Apéndice B) y la Tabla 2.4. Se encontró que estas harinas cumplen con dichas especificaciones. La harina perteneciente al grupo 2 (panadera) es una harina que da un poco más de volumen, con gluten más fuerte y elástico (mayor tenacidad y menor extensibilidad), en comparación con las otras harinas utilizadas (galletera, pastelera y comercial) de los grupos 3 y 4.

4.2. Pruebas fisicoquímicas

Los datos obtenidos para esta parte de la investigación se encuentran en el Apéndice C. En la Tabla 4.4 se presentan los datos fisicoquímicos obtenidos para productos elaborados a partir de una harina comercial. De los datos de esta tabla se observa, de manera general, que se obtiene una mayor expansión del producto a 600 rpm y 35% de humedad, obteniéndose una mayor absorción de aceite y un menor coeficiente de fractura, lo que indica una mejor textura. También se observa que al aumentar la velocidad rotacional del tornillo, disminuye el grado de expansión y aumenta la absorción de aceite y el coeficiente de fractura, obteniéndose un producto de menor calidad. Al disminuir la humedad se observa el mismo comportamiento que en el caso anterior.

Tabla 4.1. Clasificación de las harinas por su calidad panadera

HARINA	CARACTERÍSTICAS
Comercial	(GRUPO 3 y 4) Mezcla compuesta predominantemente de trigos blandos de bajo contenido proteínico y trigos fuertes en menor cantidad (20%). Se usa para elaboración de pasteles y galletas
Galletera	(GRUPO 3) Trigos suaves, gluten elástico y extensible, débiles, produce pan de muy bajo volumen
Pastelera	(GRUPO 4) Trigos suaves, gluten corto, tenaz, muy semejante a la harina galletera, produce pan poco esponjoso
Panadera	(GRUPO 2) Trigos medio fuertes, gluten medio fuerte, produce pan no muy esponjoso

Tabla 4.2. Análisis proximal de las harinas en base húmeda (g/100)

Determinación	Harina comercial	Harina galletera	Harina panadera	Harina pastelera
Humedad	10.3	12.1	11.8	11.9
Cenizas	0.79	0.69	0.75	0.72
Proteína*	11.40	9.82	11.27	9.05
Extracto etéreo	3.50	2.25	3.22	2.73
Fibra	0.30	0.31	0.28	0.30
Hidratos de carbono	73.71	74.83	72.68	75.30

* Factor utilizado para determinar proteína, % N x 5.7

Tabla 4.3. Análisis proximal de las harinas en base seca (g/100)

Determinación	Harina comercial	Harina galletera	Harina panadera	Harina pastelera
Materia seca	89.70	88.20	87.90	88.10
Cenizas	0.88	0.85	0.78	0.82
Proteína*	12.71	12.78	11.17	10.27
Extracto etéreo	3.90	3.65	2.56	3.10
Fibra	0.34	0.32	0.35	0.34
Hidratos de carbono	82.17	82.40	85.14	85.47

* Factor utilizado para determinar proteína % N x 5.7

Tabla 4.4. Datos fisicoquímicos de una harina comercial extrudida y freída

Muestra	% Humedad "pellet"	% Humedad fritura	Coefficiente expansión (cm)	% Absorción aceite	Coefficiente fractura (10 ⁹)
COM1 600-30	10.0	3.6	0.507	3.98	2.892
COM2 600-33	9.8	4.3	0.638	4.67	1.889
COM5 600-35	10.6	3.9	0.781	4.92	1.667
COM7 900-30	9.8	4.2	0.566	4.12	1.636
COM8 900-33	10.2	5.1	0.587	4.79	3.130
COM9 900-35	11.0	3.8	0.657	5.11	2.371
COM10 1200-30	9.4	4.4	0.497	4.22	3.648
COM11 1200-33	9.6	3.2	0.506	4.96	3.272
COM12 1200-35	9.9	3.1	0.636	5.27	2.472

*Fritura a 180°C por 12-15 segundos

COM = Harina comercial

4.3. Comparación por variación del almidón en la formulación

En las Tablas 4.5 a 4.9 se presentan los resultados de las variaciones de almidón en la formulación de cada una de las harinas estudiadas. De los resultados de la Tabla 4.5 se observa que al aumentar el contenido de almidón en la formulación, aumenta el coeficiente de expansión y la absorción de aceite, al mismo tiempo el coeficiente de fractura disminuye, lo que significa que los productos tiendan a ser más suaves y con mayor tamaño.

En la Tabla 4.6 se observa que al aumentar el porcentaje de almidón en la formulación con harina galletera, se incrementa la expansión del producto y la cantidad de aceite absorbido, disminuyendo el coeficiente de fractura, obteniéndose un producto de mejor textura. En la Tabla 4.7 se observa que al aumentar la concentración del almidón en el producto con harina panadera, sucede lo mismo, aumento en expansión, en la absorción de aceite y disminución del coeficiente de fractura. La Tabla 4.8 muestra que al aumentar la cantidad de almidón en la formulación con harina pastelera se dan las mismas características en los productos que con las demás harinas.

En resumen, de los resultados obtenidos en las variaciones de almidón dentro de las formulaciones de los diferentes tipos de harina, se observó que la influencia de la cantidad de almidón adicionado es determinante para la elaboración de los productos, ya que se pudo constatar que, independientemente del origen y tipo de harina utilizada, los productos presentaron mejores

características al aumentar la cantidad de almidón en la formulación. Al evaluar los productos con pruebas fisicoquímicas se obtuvieron mejores resultados con los productos elaborados con un 25% de almidón en su formulación, obteniéndose productos más expandidos y con una superficie de aspecto externo liso, menos burbujoso y más crujientes al degustar.

Tabla 4.5. Datos fisicoquímicos de una harina comercial extrudida y freída (con adiciones de almidón)

Muestra	Velocidad rotacional, contenido de humedad y % almidón	%Humedad "pellet"	%Humedad fritura	Coef. expansión (cm)	% Absorción de aceite	Coef. fractura ($\times 10^9$)
COM3	600, 35, 0	10.2	3.6	0.735	4.50	2.135
COM4	600, 35, 7.5	9.6	4.2	0.756	4.71	2.012
COM5	600, 35, 15	10.6	3.9	0.781	4.92	1.677
COM6	600, 35, 25	9.9	4.6	0.795	4.98	1.247

COM = Harina comercial

Tabla 4.6. Datos fisicoquímicos de una harina galletera extrudida y freída adicionada con almidón

Muestra	Velocidad rotacional, contenido de humedad y % almidón	%Humedad "pellet"	%Humedad fritura	Coef. expansión (cm)	% Absorción de aceite	Coef. fractura ($\times 10^9$)
GAL1	600, 35, 0	10.1	4.1	0.565	3.72	4.285
GAL2	600, 35, 7.5	9.8	4.1	0.582	4.26	3.599
GAL3	600, 35, 15	9.8	3.9	0.591	4.31	2.239
GAL4	600, 35, 25	10.0	4.5	0.715	4.71	2.416

GAL = Harina galletera

Al relacionar las cuatro variables fisicoquímicas utilizadas, se observa que, al aumentar la cantidad de almidón en la formulación se observa una mayor expansión y un coeficiente de fractura menor, lo que indica que tienen una mejor textura debido a que el producto presenta menos resistencia a la mordida a pesar de ser crujiente y, por lo tanto, el producto es más aceptable por el consumidor.

Tabla 4.7. Datos fisicoquímicos de una harina panadera extrudida y freída

Muestra	Velocidad rotacional, contenido de humedad y % almidón	%Humedad "pellet"	%Humedad fritura	Coef. expansión (cm)	% Absorción de aceite	Coef. fractura ($\times 10^9$)
PAN1	600, 35, 0	10.9	4.4	0.649	3.33	2.875
PAN2	600, 35, 7.5	9.4	5.3	0.719	4.48	2.684
PAN3	600, 35, 15	10.0	3.9	0.752	4.69	2.218
PAN4	600, 35, 25	11.6	4.6	0.790	5.25	1.858

PAN = Harina panadera

Tabla 4.8. Datos fisicoquímicos de una harina pastelera extrudida y freída

Muestra	Velocidad rotacional, contenido de humedad y % almidón	%Humedad "pellet"	%Humedad fritura	Coef. expansión (cm)	% Absorción de aceite	Coef. fractura ($\times 10^9$)
PAS1	600, 35, 0	11.5	5.1	0.809	4.19	2.323
PAS2	600, 35, 7.5	9.4	4.4	0.825	4.18	1.763
PAS3	600, 35, 15	9.3	4.0	0.832	5.20	1.583
PAS4	600, 35, 25	10.9	3.8	0.865	5.85	1.551

PAS = Harina pastelera

De acuerdo con este criterio se observó que los productos que presentaban menor expansión y mayor coeficiente de fractura, fueron los elaborados a partir de la harina galletera, seguidos de la harina panadera. Los productos que presentaron las mejores características fueron los elaborados a partir de la harina pastelera, presentando una mayor expansión y coeficientes de fractura menores, siendo su textura más agradable en cuanto a aspecto físico externo, más liso, sin burbujas y, al morder, más crujientes. Los productos elaborados con harina comercial siguieron a los de harina pastelera en cuanto a mejores características. Se cree que esto se debe a la calidad proteínica de las harinas ya que, de acuerdo con la clasificación realizada ^(31,39), se sabe que las características de calidad proteínica determinan las propiedades panaderas, según la Tabla 4.3.

En general, se puede decir que la harina comercial, que es una mezcla compuesta predominantemente de trigos blandos de bajo contenido proteínico y en menor cantidad (20%) de trigos fuertes, presenta características muy similares a la harina pastelera, compuesta de trigos suaves, por lo cual se observó que este tipo de harinas son las más adecuadas para la elaboración de estos productos, ya que presentaron mejores características en todas las pruebas realizadas. La harina

panadera, que se compone de trigos medio fuertes, da productos un poco más expandidos y de mejores características que la harina galletera, la cual como se observó fue la que presentó resultados desfavorables para este tipo de productos.

4.4. Evaluación sensorial

En la Tabla 4.9 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación preliminar realizada con los productos extrudidos y freídos obtenidos a partir de harina comercial, galletera, panadera y pastelera, con variaciones de almidón en su formulación. Para lo anterior se utilizó una escala hedónica estructurada del 1 al 10, siendo 10 la máxima calificación.

Tabla 4.9. Resultados de la evaluación preliminar para los diferentes productos extrudidos y freídos

Muestra	Tamaño	Forma	Dureza manual	Dureza bucal	Crujiente	Calif. Promedio
COM3	5	6	7	4	3	5
COM4	5	7	6	4	3	5
COM5	7	4	7	5	7	6
COM6	8	7	8	8	8	8
GAL1	2	2	2	2	2	2
GAL2	4	4	3	2	2	3
GAL3	5	3	6	5	6	5
GAL4	8	5	8	7	7	7
PAN1	2	2	4	3	4	3
PAN2	5	4	4	3	4	4
PAN3	6	5	6	7	6	6
PAN4	7	8	8	9	8	8
PAS1	6	3	3	4	4	4
PAS2	6	5	5	7	7	6
PAS3	7	5	5	6	7	6
PAS4	9	9	9	9	9	9

COM = Harina comercial

GAL = Harina galletera

PAN = Harina panadera

PAS = Harina pastelera

Muestras seleccionadas para la evaluación sensorial con consumidores

En la Tabla 4.10 se dan los resultados de los cuestionarios realizados durante la evaluación sensorial con consumidores.

Tabla 4.10. Resultados de la evaluación sensorial (con consumidores)

JUEZ	392	485	743	321
1	4.8	3.0	3.4	3.7
2	4.6	2.9	7.3	1.2
3	2.0	5.0	9.2	10.0
4	1.4	5.4	10.0	7.4
5	4.0	2.6	5.2	1.9
6	5.3	5.3	9.7	9.7
7	5.3	0.9	5.3	9.2
8	5.5	9.3	0.2	10.0
9	0.9	5.3	9.6	4.6
10	0.3	0.5	5.0	9.8
11	5.3	9.6	9.6	9.6
12	0.9	9.6	5.2	5.2
13	0.9	3.0	4.6	1.7
14	0.9	7.5	7.5	2.9
15	5.3	5.2	1.0	0.2
16	5.3	0.9	5.3	5.2
17	9.8	8.9	5.2	3.5
18	2.3	0.9	2.9	5.7
19	3.6	9.1	8.6	0.9
20	5.2	0.9	5.2	0.9
21	1.4	5.3	4.4	6.6
22	0.9	5.2	0.9	5.5
23	2.5	4.9	3.9	0.9
24	9.2	5.8	0.9	0.6
25	3.9	10.0	10.0	1.4
26	0.9	0.9	5.1	5.1
27	2.6	9.2	7.2	4.7
28	4.3	5.3	5.1	2.1
29	5.3	3.8	1.0	1.8
30	3.6	6.8	5.5	6.6
31	4.5	2.8	7.5	5.3
32	3.1	7.1	5.8	2.7
33	3.0	5.4	5.3	2.8
34	2.9	8.1	5.4	3.4
35	0.2	5.3	3.5	5.3
36	4.3	5.3	5.3	5.3
37	4.3	5.3	5.0	5.1
38	3.0	6.2	4.8	1.8
39	2.5	5.3	5.0	3.6
40	4.0	9.5	8.0	5.0
41	2.4	4.6	4.3	3.9
42	0.1	3.3	5.2	0.9
43	4.3	4.6	3.4	1.9
44	2.0	7.9	4.4	3.9
45	3.5	4.8	6.3	3.6
46	1.0	6.2	6.4	3.1
47	2.3	7.3	5.3	4.8
48	2.5	7.2	5.0	3.0
49	2.7	9.7	5.7	1.7
50	4.8	3.8	6.1	3.5
51	2.9	4.0	4.0	2.1
52	2.0	2.8	3.0	4.6
53	4.4	7.7	7.5	2.0
54	3.9	6.4	5.2	2.6
55	2.3	4.3	4.2	1.6
56	2.9	8.8	7.7	4.6
57	5.0	1.9	4.4	1.9
58	3.3	5.3	5.3	4.6
59	3.0	3.7	4.5	2.1
60	1.8	5.8	8.8	1.8
61	2.0	5.6	6.6	3.0
62	2.1	8.6	8.3	3.9
63	0.9	5.3	3.7	1.9
64	0.9	4.6	7.0	4.7
65	0.9	9.8	5.3	5.3
66	2.0	2.9	3.3	2.4
67	3.9	7.5	7.7	5.0
68	2.5	5.3	5.0	3.6
69	4.3	4.6	4.3	2.9
70	2.0	7.9	4.4	3.9
71	2.6	9.2	7.5	4.8
72	4.2	2.9	7.2	5.1
73	0.9	9.6	5.2	5.3
74	1.7	5.1	4.6	6.2
75	3.7	10.0	10.0	1.2
76	2.9	4.0	3.2	3.0
77	2.1	7.3	5.5	2.9
78	0.2	5.9	3.2	5.3
79	1.5	5.5	9.0	7.3
80	3.6	5.8	1.1	5.6
81	2.3	5.3	4.3	5.5
82	1.8	3.0	9.7	1.2
83	5.5	3.7	8.2	6.1
84	9.2	3.8	1.9	3.5
85	5.3	8.9	7.5	9.6
86	3.6	3.6	5.5	5.3
87	6.3	8.9	7.3	0.9
88	2.5	0.9	3.2	2.2
89	5.3	3.8	5.1	1.4
90	4.0	5.0	8.0	2.7
91	3.2	6.5	3.6	3.4
92	1.2	4.0	3.5	1.2
93	3.3	9.8	4.6	0.9
94	1.9	3.8	2.3	0.9
95	7.0	9.8	4.6	2.9
96	6.2	7.9	3.9	2.1
97	3.5	4.2	4.2	3.8
98	4.9	7.5	7.5	2.6
99	6.6	5.5	9.2	3.3
100	3.5	5.8	4.5	5.6
PROM	3.283	5.625	5.470	1.875

De los resultados anteriores se observó una preferencia por los productos elaborados a partir de harina comercial y pastelera, con una calificación promedio de 3.3 y 3.9, respectivamente y una menor aceptación por los productos elaborados a partir de harinas galletera y panadera, con una calificación promedio de 5.6 y 5.5 respectivamente.

Respecto al nivel de agrado se observó que los productos tendieron a gustar poco. Esto puede deberse a que los productos se manejaron de una manera muy simple de acuerdo al concepto que se tiene de este tipo de productos, ya que por tratarse de una botana tipo chicharrón suele asociarse con los típicos sabores de Chile, sal y limón. Por lo anterior, se observó una tendencia a opinar que había una deficiencia de sabor en el producto. Los atributos sensoriales que el consumidor respondió con una mayor frecuencia fueron: crujientes (76.4%) grasoso (36.8%) y salado (15.7%).

4.5. Análisis estadísticos

En las Tablas 4.11 a 4.13 se muestran los resultados obtenidos del análisis estadístico aplicado a las pruebas físicoquímicas realizadas a los productos elaborados a partir de harina comercial. En estas pruebas se observó la influencia de la velocidad rotacional del tornillo del extrusor y de la humedad sobre la expansión, la absorción de aceite y la textura de los productos.

En las Figuras 4.1 a 4.6 se presentan las superficies de respuesta obtenidas de los datos de expansión, de absorción de aceite y de textura. Como puede observarse en la Figura 4.1 la expansión aumenta conforme se incrementa la velocidad rotacional del tornillo y conforme aumenta la humedad (Figura 4.2).

Esto se debe a que la humedad contenida en la masa tiene un efecto lubricante, provocándose un menor esfuerzo cortante y una disminución en el calor liberado por fricción por lo que la temperatura disminuye. Por tanto, las moléculas de amilosa y amilopectina no se deterioran tanto por los efectos de temperatura, presión y fuerza de cizalla que influyen determinadamente en las condiciones de *extrusión*. Se favorece, por lo tanto, una mejor expansión al encontrarse las moléculas menos dañadas.

Tabla 4.11. Resultados estadísticos obtenidos para el efecto de la expansión

ANDEVA para las variables en el orden apropiado para la obtención de la superficie de respuesta

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	valor P
30 33 35 30 33 35 30 33 35	2.76516229	1	2.7651623	21.08	0.0194
600 600 600 900 900 900 1200 1200 1200	0.18026667	1	0.1802667	1.37	0.3257
900 1089 1225 900 1089 1225 900 1089 1225	1.46154793	1	1.4615479	11.14	0.0444
360000 360000 360000 810000 810000 810000	0.01868889	1	0.0186889	0.14	0.7346
18000 19800 21000 27000 297000	2.10432112	1	2.1043211	16.05	0.0279
Modelo	6.52998690	5			

Análisis de varianza para la regresión completa

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor P
MODELO	6.52999	5	1.30600	9.95828	0.0437
ERROR	0.004861	3	0.001553		
TOTAL(corr.)	6.92343	8			

Rc

uadrada = 0.943173 Error estándar estimado = 0.03389
Rcuadrada(ajustada por GL) = 0.84846 Estadístico Durban-Watson = 2.43692

RESUMEN RESIDUAL

Número de observaciones = 9 (0 valores excluidos)

Promedio residual = 0.139034

Varianza residual = 0.033894

Error estándar residual = 9.57259E-15

Coefficiente de "skewness" = 0.40283

Valor estandarizado = 0.493364

Coefficiente de Kurtosis = -1.23242

Valor estandarizado = -0.754698

Estadístico de Durban-Watson = 2.48997

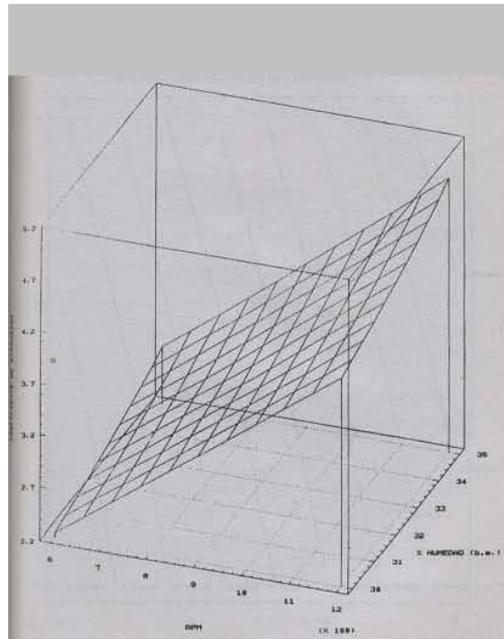


Figura 4.1. Superficie de respuesta del efecto de expansión

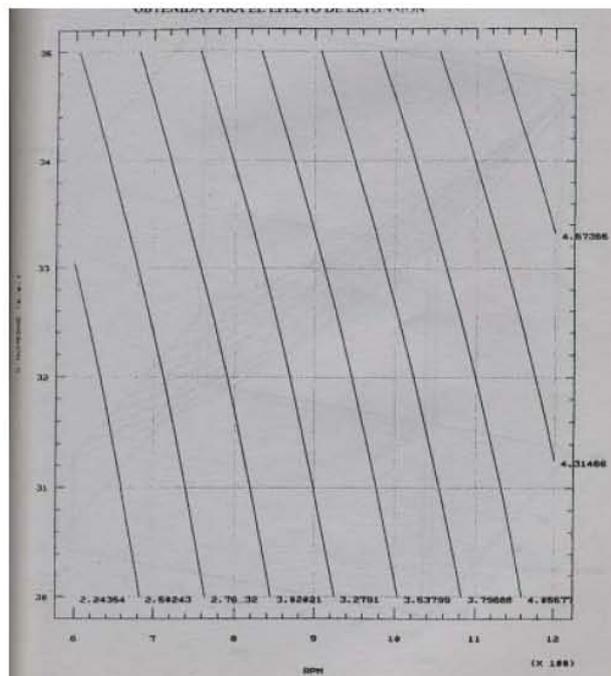


Figura 4.2. Corte transversal de la superficie de respuesta obtenida para el efecto de la expansión

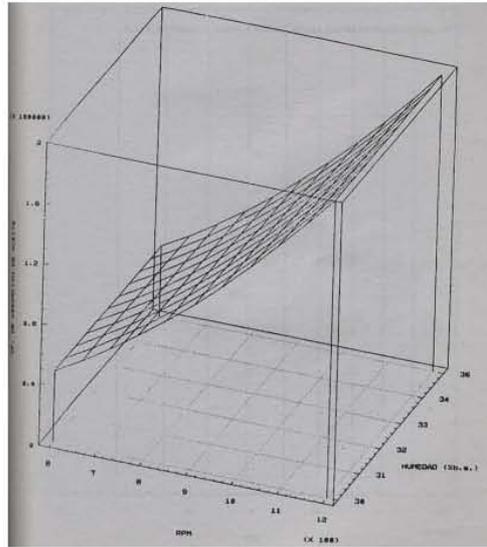


Figura 4.3. Superficie de respuesta obtenida para el efecto de absorción de aceite

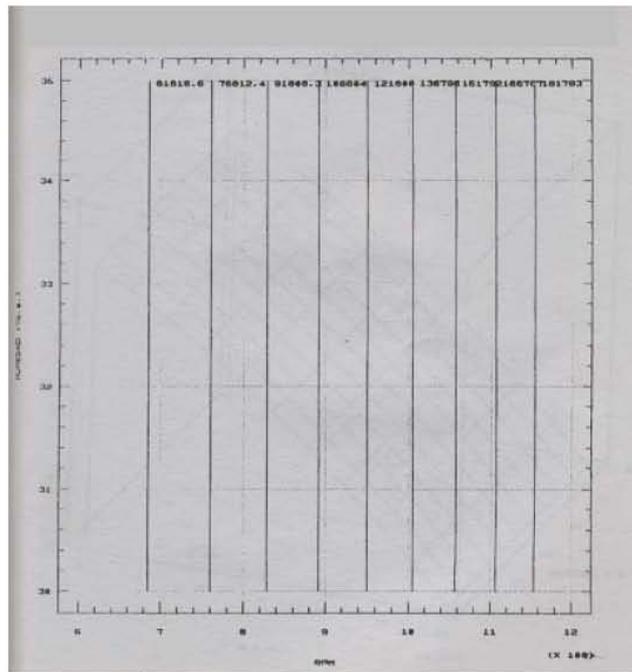


Figura 4.4. Corte transversal de la superficie de respuesta obtenida para el efecto de absorción de aceite

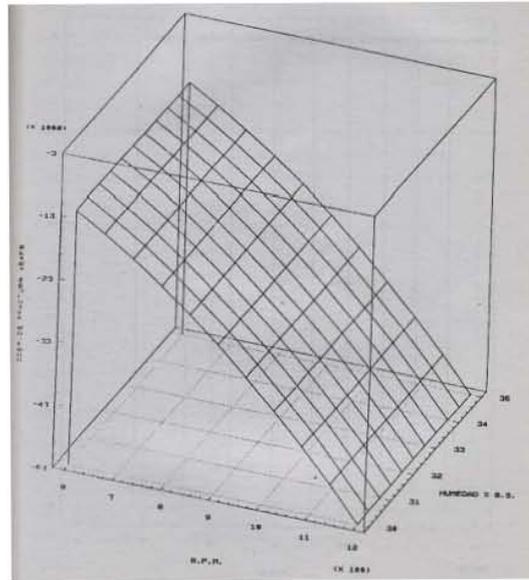


Figura 4.5. Superficie de respuesta obtenida para el efecto de textura

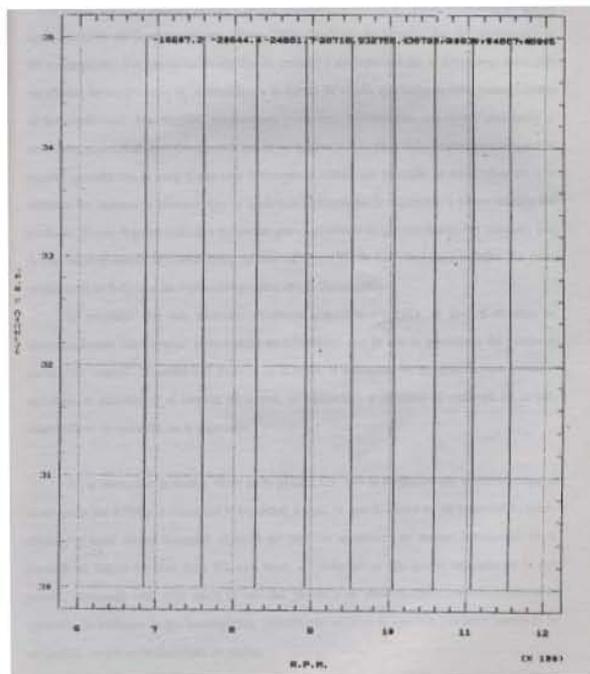


Figura 4.6. Corte transversal de la superficie de respuesta obtenida para el efecto de textura

Se observa que la temperatura del extrusor aumenta con el incremento de la velocidad rotacional del tornillo (fuerza de cizalla) y, por lo mismo, una mayor fricción sobre la masa y esto puede dar lugar a reacciones de caramelización que fragmentan las cadenas de los almidones, provocando entonces que se apelmace la masa y dando productos con una menor expansión y una textura indeseable. El caso extremo es que se queme el producto dentro del extrusor, ocasionando un grave problema técnico en cuanto al manejo del equipo y al deterioro total del producto dentro del extrusor. Tomando en consideración todo lo anterior, se propusieron las condiciones de operación de 600 rpm para la velocidad rotacional y 35% de humedad como las condiciones más adecuadas para trabajar con la *extrusión* de los productos elaborados con harinas de trigo, de tal forma que las moléculas de almidón se dañen lo menos posible, dando como resultado un producto de mayor calidad y al mismo tiempo, facilitar la operación del equipo de trabajo.

Es probable que en las condiciones en que se trabaja la *extrusión*, se produzcan oligosacáridos ^(17,29,34), puesto que el almidón se fracciona dentro del extrusor, aumentando su solubilidad y por este motivo la estructura del producto queda más “suave”. Si aumenta la fricción de la masa, la estructura de la proteína, que contiene embebido al almidón en el interior de la red, se reblandece y aumenta el volumen de la red, observándose un aumento en la expansión.

En la Figura 4.3 se observa el efecto de la absorción de aceite que aumenta al incrementarse la velocidad rotacional del tornillo (rpm) y al aumentar la humedad inicial. La fritura es un intercambio agua- aceite y el tener una mayor humedad favorece un mejor intercambio en el proceso de fritura (Figura 4.4). En este caso, el aceite se fija y queda atrapado en la red interna, formando una capa entre la red del gluten y el almidón ⁽⁶²⁾, contribuyendo a la retención de burbujas de gas de manera homogénea. Debido a lo anterior, se observa que entre mayor es la expansión, mayor es la absorción de aceite.

En la Figura 4.5 se observa que el coeficiente de fractura disminuye con el aumento de las revoluciones del tornillo y cuando aumenta la humedad, lo que significa que existe menor resistencia a la fractura del producto. Esto muestra que la textura de los productos puede resultar mejor a mayores rpm y a mayor humedad (dentro de los límites permisibles de estas condiciones), aunque esta última influye menos, como se puede ver en la Figura 4.6. En este caso los resultados no fueron tan relevantes, como lo indica la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Análisis estadístico de la F de FISHER para las pruebas fisicoquímicas

PRUEBA FISICOQUÍMICA	F TABLAS (3.5)*	COMPARATIVO	F CALCULADO	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
ABSORCIÓN	9.9582	>	5.41	SI
EXPANSIÓN	7.5171	>	5.41	SI
COEF. FRACTURA	2.5060	<	5.41	NO

*Nivel de significancia 0.05%

Como se observa en la Tabla 4.14, existe diferencia significativa en el caso de la expansión; esto es, las condiciones de la velocidad rotacional (rpm) y de la humedad, influyen de manera significativa en la elaboración de estos productos.

El caso de la absorción de aceite también es una condición que influye de manera determinante. Con el coeficiente de fractura, se observó que dichas condiciones no afectan de manera significativa en la elaboración de los productos.

Lo más probable es que sea necesario evaluarlos por otro método más sensible, ya que no hay diferencia significativa entre las variables evaluadas y el coeficiente de fractura obtenido.

Cabe mencionar que estos resultados son confiables en un 95% para un intervalo pequeño, recordando que con otras condiciones el producto se daña fácilmente y no es satisfactorio para su consumo.

4.6. Evaluación sensorial

A continuación, en las Tablas 4.15 a 4.17, se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza para la evaluación sensorial ^(50, 51).

Tabla 4.15. Medias para HARINAS-RESPUESTA por HARINAS HARINAS

Harina	Respuestas	Error Est Promedio	Error Est. (interno)	Error Est. (integrado)	95% LSD media de intervalos	
392	100	3.2830000	0.1936416	0.2265032	2.9680565	3.5979435
485	100	5.6250000	0.2498257	0.2265032	5.3100565	5.9399435
743	100	5.4700000	0.2265976	0.2265032	5.1550565	5.7849435
321	100	3.8750000	0.2322893	0.2265032	3.5600565	4.1899435
total	400	4.5632500	0.1132516	0.1132516	4.4057782	4.7207218

LSD, siglas en inglés para designar la diferencia mínima significativa (“Least Significant Difference”)

Tabla 4.16. Análisis de intervalos múltiples para HARINA-RESPUESTA por HARINAS-HARINAS

Método: 95% LSD			
Harina	Respuesta	Promedio	Grupos homogéneos
392	100	3.2830000	x
321	100	3.8750000	x
743	100	5.4700000	x
485	100	5.6250000	x

Contraste	Diferencia +/-	Límites	
392-485	-2.34200	0.62989*	
392-743	-2.18700	0.62989*	
392-321	-0.59200	0.62989	
485-743	0.15500	0.62989	
485-321	1.75000	0.62989*	
743-321	1.59500	0.62989*	

*se observa la diferencia significativa estadísticamente

Tabla 4.17. Análisis de varianza por una vía

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F calculada	Nivel de significancia
Entre harinas	40.62237	3	135.40789	26.393	0.0000
Entre respuestas	2031.6261	396	5.13037		
Total(corr.)	2437.8498	399			

Se realizó un análisis de varianza (por una vía) por medio de una suma de cuadrados, obteniéndose los resultados de la tabla 4.18.

Tabla 4.18. Análisis estadístico de la F de Fisher para la evaluación sensorial

Nivel de significancia	F tablas (3,99)	Comparativo	F calculado	Diferencia Significativa A
0.05	2.60	<	26.393	Si
0.01	3.78	<	26.393	Si

Se observa que por lo menos una de las harinas usada es diferente de las otras, con un nivel de confianza del 95% y del 99%. Para conocer cuáles de las harinas son diferentes entre sí se calculó la Diferencia Mínima Significativa de Fisher (DMS), obteniéndose los siguientes resultados:

Rayado de Duncan

Comercial - Pastelera

392 321



Panadera - Galletera

743 485



Se observa a 95% de confianza, no hay diferencia mínima significativa entre la harina comercial y la pastelera, así como entre la panadera y la galletera, es decir, que sensorialmente la harina comercial es muy semejante a la pastelera y que también la galletera es muy semejante, sensorialmente, a la panadera (Figura 4.7).

Los productos elaborados con base en harina comercial de trigo tuvieron un mayor nivel de agrado y el que menos gustó fue elaborado a partir de harina galletera.

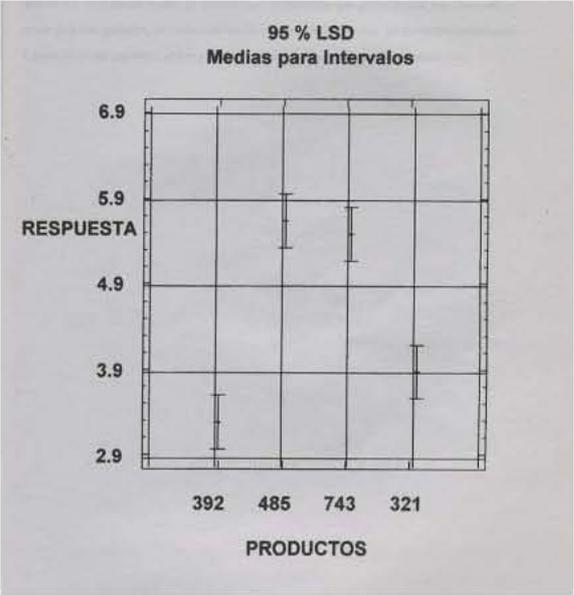


Figura 4.7. Respuesta promedio de la aceptación a nivel de consumidores

CAPÍTULO 5

Selección, supervisión de la construcción y arranque de una planta de extrusión ^(47,60)

El diseño en Ingeniería de Alimentos contempla varios aspectos para que las técnicas de procesamiento de alimentos sean versátiles, eficientes y rindan productos de óptima calidad. La aplicación de las técnicas de *extrusión* ha resultado muy ventajosa en la producción de alimentos. Sus ventajas entre otras muchas, ya discutidas con anterioridad, se deben al modo de operar de los extrusores que, con un tiempo corto de someter a la materia prima a energía mecánica y térmica, se logran diversos cambios en estructura y composición para obtener una serie de productos atractivos en muchos aspectos.

El estudio de los extrusores, junto con su modo de operación, variables, tipos, etc., por sí sólo no dice mucho en lo que a un diseño de una planta de producción completa se refiere, ya que todos los procesos anteriores y posteriores a la etapa de *extrusión* deben ser considerados, estudiados y evaluados para que todo el conjunto dé por resultado el producto esperado. En la presente investigación aplicada se ha procurado estudiar la materia prima, introducirse a los procesos de *extrusión* y secado (Apéndices D y E), contemplar las variables que afectan a los mismos, pero todo hay que conjuntarlo armónicamente con una serie de equipos auxiliares e instalaciones y consideraciones que permitan planear, seleccionar el equipo, supervisar la construcción y arranque de una planta de *extrusión*. Los estudios a nivel de laboratorio, definitivamente no son fáciles de trasladar a un nivel de industria, pero son de mucha ayuda para introducirse al tema y contemplar varios criterios que serán útiles a gran escala.

El diseño de una línea de producción que contenga un extrusor sigue casi siempre ciertos principios generales. Sin embargo, para cada producto específico, el extrusor debe trabajar junto con una serie de equipos e instalaciones especiales, que hacen del diseño de planta para diferentes productos, un caso especial.

5.1. Extrusores cocedores para la producción de alimentos con almidón

La selección de un extrusor cocedor es uno de los pasos más importantes. Como ya se mencionó, existen diferentes tipos de extrusores, y dentro de ellos, algunos presentan ventajas sobre otros, al igual que desventajas. Hay que tomar en cuenta ciertas características que tienen los diferentes extrusores para luego así, comenzar a definir si es conveniente un extrusor simple, o uno doble y el tipo que más convenga, según sean las ventajas y desventajas que ofrezcan para un producto en particular. En la Tabla 5.1 se resumen los tipos y características distintivas de los principales tipos de extrusores comerciales:

Tabla 5.1. Características distintivas de varios tipos de extrusores ⁽⁴⁷⁾

Características	Extrusor simple	Extrusor doble tornillo		
		Intermezclado-cilíndrico Co-rotativo	Intermezclado-cónico Contrarrotativo	Intermezclado-cónico Contrarrotativo
Llenado	X	XX	XX	XX
Transporte	X	XX	XXX	XXX
Mezclado	X	XXX	X	X
Compresión	XX	XX	XXX	XXXX
Amasado	X	XXX	XX	XX
Plastificación	XXX	XXXX	XX	XXX
Transferencia de calor	XX	XX	XX	XXX
Generación de calor	XX	XXX	X	X
Velocidad de tornillo	Variable	Variable	Bajo	Bajo
Geometría de tornillo	Fijo/en parte variable	Variable	Variable	Fijo
Auto limpieza	-	+	-	-
Desgaste	Bajo	Medio	Alto	+ Alto

X El número de símbolos indica el grado en que la característica se presenta

La Tabla 5.1 muestra las diferentes funciones que cada extrusor ejecuta. Son, por lo tanto, diferentes tareas en la extrusión por cocción a diferentes niveles. El mejor transporte, por ejemplo, se logra con un extrusor de doble tornillo a contrarrotación. También se tiene buen transporte en los extrusores de doble tornillo de intermezclado co-rotativos, los cuales transportan eficientemente partículas sólidas, como harina, mejor que en los extrusores

simples de un tornillo. Entre los extrusores simples, el mejor transporte se tiene en aquellas máquinas que poseen un barril ranurado o acanalado.

El flujo de masa y el grado de llenado del tornillo para doble tornillo, intermezclado, co-rotativo, pueden variar en un intervalo amplio según sea la velocidad del tornillo y torque permitido. Esto es especialmente significativo en cuanto a la intensidad de transferencia de energía y las características que resulten en el producto.

Un mezclado eficiente es muy importante para el control de variables como la humedad. En los extrusores de tornillo simple el mezclado no es tan eficiente, para que funcionen mejor y se solucione esta deficiencia, se considera como un paso adicional e importante, un previo premezclado y preacondicionamiento de la masa. En los “pellets” hay considerables variaciones en las características de calidad de producto final con poca diferencia (1%) en el contenido de humedad ^(61, 69).

En los extrusores es importante mantener temperaturas constantes de la masa a extrudir en las diferentes secciones a lo largo del mismo, a fin de lograr uniformidad del producto resultante. Según sea el producto y las necesidades que se requieran, se deben controlar otras variables como la velocidad de rotación del tornillo, las temperaturas en el interior del barril, la humedad de la masa, la presión, etc.

La gelatinización (plastificación) del almidón se ve favorecida en extrusores de doble tornillo de intermezclado cónico usando un esfuerzo de corte relativamente bajo, por la buena transferencia de energía que se tiene. Una gelatinización similar se puede alcanzar con un tornillo simple, con un torque mayor que se logra por su diseño y su construcción.

Finalmente, los criterios tales como la limpieza y el desgaste mecánico del equipo pueden ser significativos al seleccionar un extrusor. La limpieza es especialmente importante a fin de mantener el proceso funcionando en condiciones óptimas de operación. El problema es cuando la máquina se debe parar con frecuencia. Generalmente, la interrupciones de operación cortas y frecuentes, no son adecuadas para trabajar con un extrusor de tornillo simple por lo difícil que resulta la extracción y limpieza del tornillo y aún más, si el material se queda “pegado” al producirse una interrupción súbita en la operación. En este caso, el material interno se seca y se pega rápidamente y llega a quedar prácticamente “petrificado”, lo que resulta, en ocasiones, un problema difícil de

resolver. Así mismo, es de considerarse lo que a desgaste mecánico se refiere ya que esto, económicamente, puede afectar sobremanera al momento de evaluar los costos de toda la producción. Por esta razón, los extrusores con tornillos y barriles segmentados tienen ventajas obvias, ya que solamente las partes desgastadas son las que se pueden ir reemplazando además de facilitar la limpieza del equipo.

En resumen, al seleccionar un extrusor, es necesario saber primeramente las características requeridas del producto y la manera como los ingredientes y las condiciones de extrusión interactúan para producirlas. Por supuesto, las consideraciones económicas son determinantes. Los costos de inversión, de operación y de mantenimiento deben ser tomados muy en cuenta al tratar de decidir el equipo que se va a adquirir.

5.2. Aspectos especiales a considerar de la extrusión

Hasta la fecha, poco es lo que sabe acerca de la manera como las características de los productos son funcionalmente dependientes con la operación de la máquina y con los ingredientes. Empiezan a darse a conocer publicaciones al respecto con diferentes metodologías de investigación, pero una de las principales razones por lo que la investigación científica está limitada es porque los alimentos son matrices poliméricas muy complejas y heterogéneas por lo que no se dan todavía razones sólidas para la selección de un tipo de extrusor dado para un producto específico.

Como resultado, es extremadamente costoso, en cuanto a trabajo y materiales se refiere, hacer pruebas para encontrar los mejores productos (ensayo y error). Por esta razón, la aplicación práctica (en la industria) de técnicas de extrusión está basada ampliamente en información empírica. Tal como se mencionó con anterioridad, los estudios a nivel de planta piloto y de laboratorio, son de gran ayuda y dan buena orientación en muchos aspectos, pero no dan pautas definitivas en aplicaciones a gran escala.

5.2.1. Formado

Además de los cambios en las características de los productos ocasionados por la energía transferida a las masas extrudidas, es interesante considerar otros aspectos importantes como son la forma regular y homogénea de los productos

extrudidos, su uniformidad en apariencia, tamaño y peso. Los “pellets”, por ejemplo, al ser sometidos a fritura deben dar productos con apariencia uniforme y cualidades sensoriales homogéneas. Esto significa que se deben satisfacer requerimientos muy rigurosos en cuanto a forma, tamaño y textura. Estos aspectos son totalmente dependientes de los “dados” o boquillas y herramientas de corte. Se puede lograr uniformidad del producto, mientras la masa fluya suave y constantemente a través del dado. Aquí juegan un papel muy importante la regulación de las velocidades de *extrusión* y la cantidad de energía transmitida a la masa a la salida del extrusor y que esta energía se mantenga constante. El problema de formado no se tiene en botanas que sean directamente expandidas.

El formado preciso para obtener “pellets” de alta calidad es algo muy complicado usando un extrusor cocedor, ya que inmediatamente después de gelatinizado el producto, la masa plástica debe ser enfriada por debajo del punto de ebullición del agua antes de pasar a través del “dado” o boquilla. Este enfriamiento previene la expansión en el “dado” y hace posible el corte del material extrudido en tamaños precisos. Por esta razón, los extrusores de tornillo simple han dominado el mercado de botanas de tercera generación, ya que su diseño ha facilitado el calentamiento y enfriamiento por zonas para “temperar” la masa antes de que salga a través del “dado”. Aunque estas máquinas tienen una sección relativamente corta de procesamiento, su menor flujo de masa dan una relación favorable para la transferencia de calor; la superficie externa del tornillo y la superficie interna del barril dan una relación alta de superficie-volumen, que hace posible enfriar la masa lo suficiente, antes de alcanzar la salida por el “dado” y facilitar también el corte.

La necesidad de esta secuencia de calentamiento y enfriamiento de la masa para producir los “pellets” ha resultado en la separación de esta operación unitaria en dos procesos, para poder así incrementar la capacidad de producción de las máquinas. Así es como se prefiere usar dos procesos, uno que se encargue de la plastificación del material y otro del formado. Por lo tanto, serán dos los extrusores utilizados, el cocedor y el formador, ambos operados independientemente. El extrusor cocedor no tendrá entonces “dados” o boquillas, sino que saldrá la masa plastificada en trozos irregulares, que serán amasados y enfriados en el extrusor formador, en donde sí serán sometidos a pasar a través de “dados” y al corte.

La producción de “pellets” es más complicada que los productos directamente expandidos, donde sólo se necesita de un extrusor cocedor y la transmisión de energía no es un valor tan significativo e importante como en el

primer caso. En el caso de los “pellets”, las características físicas, sensoriales y nutricias sí están muy ligadas a esta transmisión de energía. Entre las características mencionadas están la expansión, la porosidad, la textura y el grado de cocimiento; también se ven afectadas su solubilidad, viscosidad, digestibilidad, composición química y la cuenta microbiana.

5.2.2. La transformación de ingredientes

La mayor parte de las propiedades físicas del producto final dependen del grado de transformación (plastificación o gelatinización) del ingrediente principal, que es el almidón. Por eso es importante tratar de entender el comportamiento del almidón cuando se somete a las condiciones de humedad y calor en el extrusor para alcanzar ese estado plástico tan importante. En el *Capítulo 2*, en el apartado sobre la funcionalidad de los ingredientes, se trata el tema detalladamente. Tampoco debe perderse de vista un material primordial que determina muchas propiedades del producto y éste es el gluten del trigo. La transformación de los materiales y su efecto sobre la textura de productos han sido discutidos en el *Capítulo 2* en el apartado de *extrusión*.

La ventaja de un extrusor es su corto tiempo de residencia y que el equipo funciona como un reactor, comparándolo con otros procesos térmicos. Así, las ventajas sensoriales, higiénicas y nutricias son fundamentales en la calidad del producto. La inactivación de esporas termofílicas y las reacciones de pardeamiento u oscurecimiento (reacciones de Maillard) alcanzan favorablemente la región de la *extrusión* ^(19,47). Esto es importante porque las reacciones de pardeamiento se relacionan con características sensoriales y nutritivas del producto que, obviamente, dependen de la temperatura, una de las variables más importantes a controlar.

La viscosidad es otra de las variables de las masas extrudidas que depende directamente del grado de suministro de energías térmica y mecánica a la masa, y ésta puede tomarse como medida de regulación y control de la *extrusión*.

Es muy importante controlar las variables del extrusor para tenerlo operando de manera uniforme y constante para garantizar una gelatinización siempre estable y asegurar que el producto será de buena calidad. Esto es especialmente necesario, ya que las características de calidad de los “pellets” solo pueden determinarse y confirmarse hasta el proceso de freído. Esto puede tomar varias horas después de salido el “pellet” del extrusor, ya que hay que considerar que se somete también a un proceso de secado y estabilización, antes

de poder confirmar el éxito de obtener el producto deseado. La interrelación de las diferentes variables puede ser revisada en el *Capítulo 2*, en la sección de *extrusión*.

5.3. Instalación de una planta de extrusión

Al construir una planta es necesario contar con especificaciones detalladas del diseño y los diagramas de fabricación de todo el equipo, incluyendo todos los servicios auxiliares, instrumentación, tuberías hidráulicas, neumáticas, energía eléctrica y demás equipo auxiliar.

Es importante discutir, antes de entrar propiamente a la descripción del proceso, del diagrama de flujo y de los equipos, los requisitos necesarios que se deben cubrir en caso de que algunos de los equipos que se empleen en el proceso de fabricación, sean de procedencia extranjera a fin de poder introducirlos en el país. Para ello, es necesario contar con lo siguiente:

- Registro Federal de Contribuyentes
- Registro del importador
- Lista de embarque
- Certificado de origen
- Pedimento aduanal
- Pago de impuestos correspondientes

Con todos estos requisitos y contratando los servicios de un agente aduanal se puede importar la maquinaria necesaria, ya sea fundamental o complementaria.

5.3.1. Diagrama de flujo

Una planta de *extrusión* para la elaboración de botanas de tercera generación se puede representar en un diagrama de flujo de bloques, que contempla el proceso general (Figura 5.1).

La primera etapa es la del almacenamiento y disponibilidad de las materias primas (en el caso particular de esta planta serán harinas y aditivos). La segunda etapa comprende la preparación de las materias primas, mediante su alimentación a través de una tolva a equipos específicos (como a una mezcladora de sólidos y a su acondicionamiento), de donde, mediante un transporte adecuado pasará a un extrusor cocedor. La tercera etapa, que es la *extrusión* propiamente dicha en el extrusor cocedor de simple tornillo, es la operación unitaria medular del proceso. La cuarta etapa contempla el formado (extrusor formador) y el acondicionamiento del producto extrudido (secador y eliminador de polvos).

Después viene el almacenamiento para mantener el producto extrudido por la vida de anaquel que sea necesaria. Cuando ya se desea preparar el producto para su consumo, viene la operación de fritura, de la que ya salen las botanas listas para la última operación. La última etapa incluye el empaque adecuado para su estabilización y la conservación óptima del “pellet”.

5.3.2. Servicios y equipos auxiliares

En un diseño o proyecto definitivo de construcción de una planta, los servicios auxiliares representan un gasto sustancial de los recursos de ingeniería. Dentro de este amplio grupo se incluyen dos subcategorías: Las instalaciones auxiliares y los servicios auxiliares. Las instalaciones auxiliares incluyen plantas de vapor, aire comprimido, electricidad, de refrigeración o enfriamiento, equipos para tratamiento de aguas de desecho, sólo por nombrar unos cuantos.

Los servicios auxiliares incluyen contemplar los accesos como calles o carreteras, entradas para vagones de ferrocarril, de trailer, las excavaciones del lugar de construcción, servicios sanitarios, cafetería, oficinas administrativas, laboratorios, además de otras posibles.

A continuación se presenta la distribución (o “*Layout*” como se le conoce en inglés) de la planta de *extrusión* a fin de visualizar en conjunto la planta con todos sus equipos y su funcionalidad en el proceso global (Figura 5.2.). La distribución de la planta se realizó y planeó con base en un espacio ya construido y así, se adaptó el equipo a este espacio.

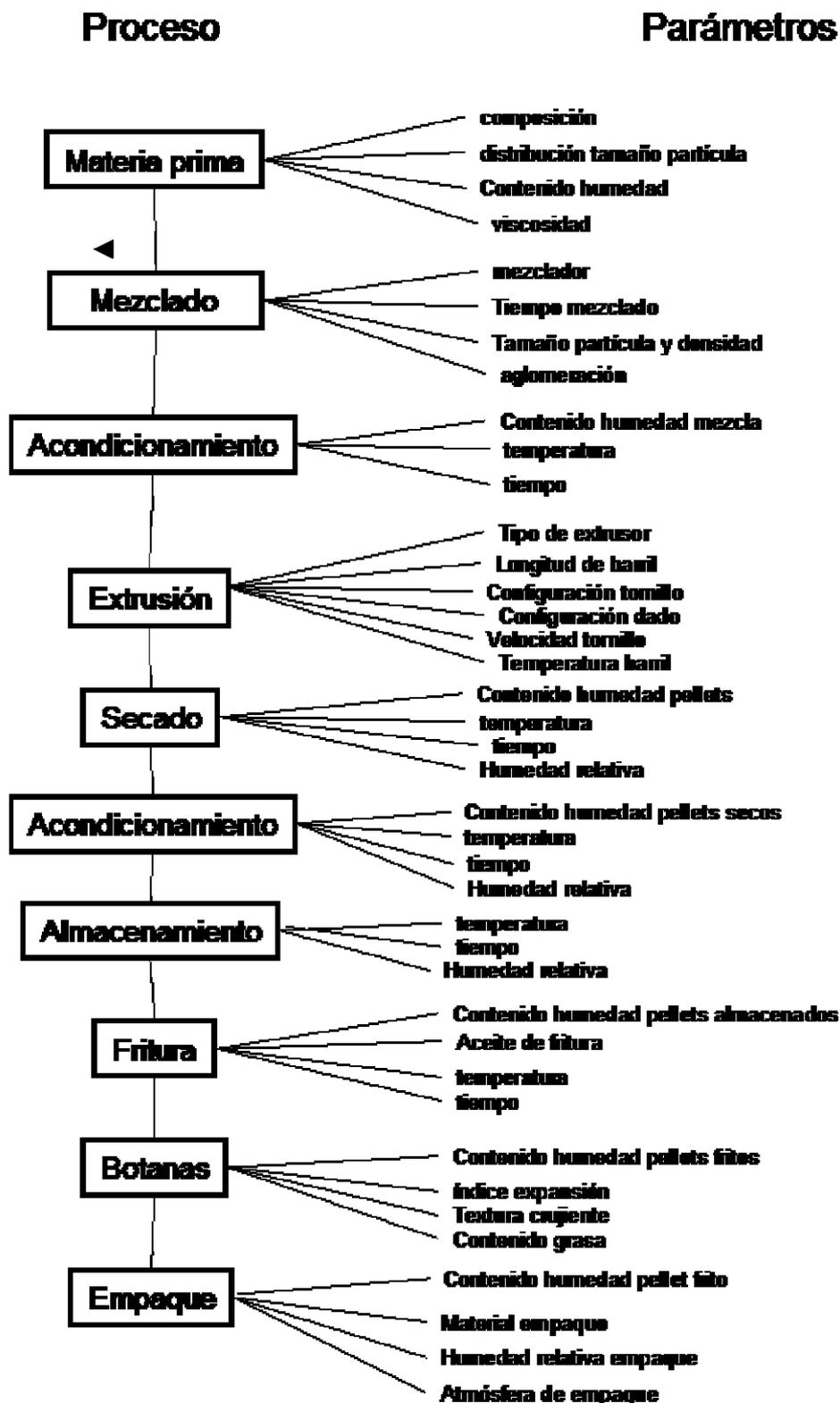


Figura 5.1. Diagrama de bloques del proceso general de elaboración de botanas de tercera generación

En la Figura 5.2 se tiene la distribución de la planta de *extrusión* en donde se observa:

En la parte superior derecha, la ubicación de carga de materias primas (9) seguido por la mezcladora (10), el extrusor formador (11) y el extrusor cocedor (12).

El secador con vibración (“trabato”, 14) recibe los “pellets” para la primera etapa de secado y los manda hacia el presecador (18) y finaliza el proceso en el secador (16), para continuar hacia la banda de enfriamiento y estabilización del producto (20) y luego hacia el almacén de producto terminado (21).

La parte inferior del diagrama muestra el almacén de materia prima (8), el área de calderas (28), el taller de mantenimiento (26), área de servicios (24 y 25) y almacén de producto terminado (21).

Las oficinas se localizan en el primer nivel junto con el área de laboratorios (33 y 34).

La planta de emergencia y la subestación se muestran en el diagrama en la esquina inferior derecha (2, 3, 4 y 5).

En la elaboración de cálculos, diagramas y planos hay que considerar los Códigos y Estándares Industriales. En este caso se han tomado en consideración los siguientes:

-Construcción:

“Reglamento de Construcción para el Distrito Federal” Leyes y Códigos de México

La obra civil y arquitectónica requieren de profesionales especializados:

-Instalaciones hidráulicas y de servicios auxiliares (vapor):

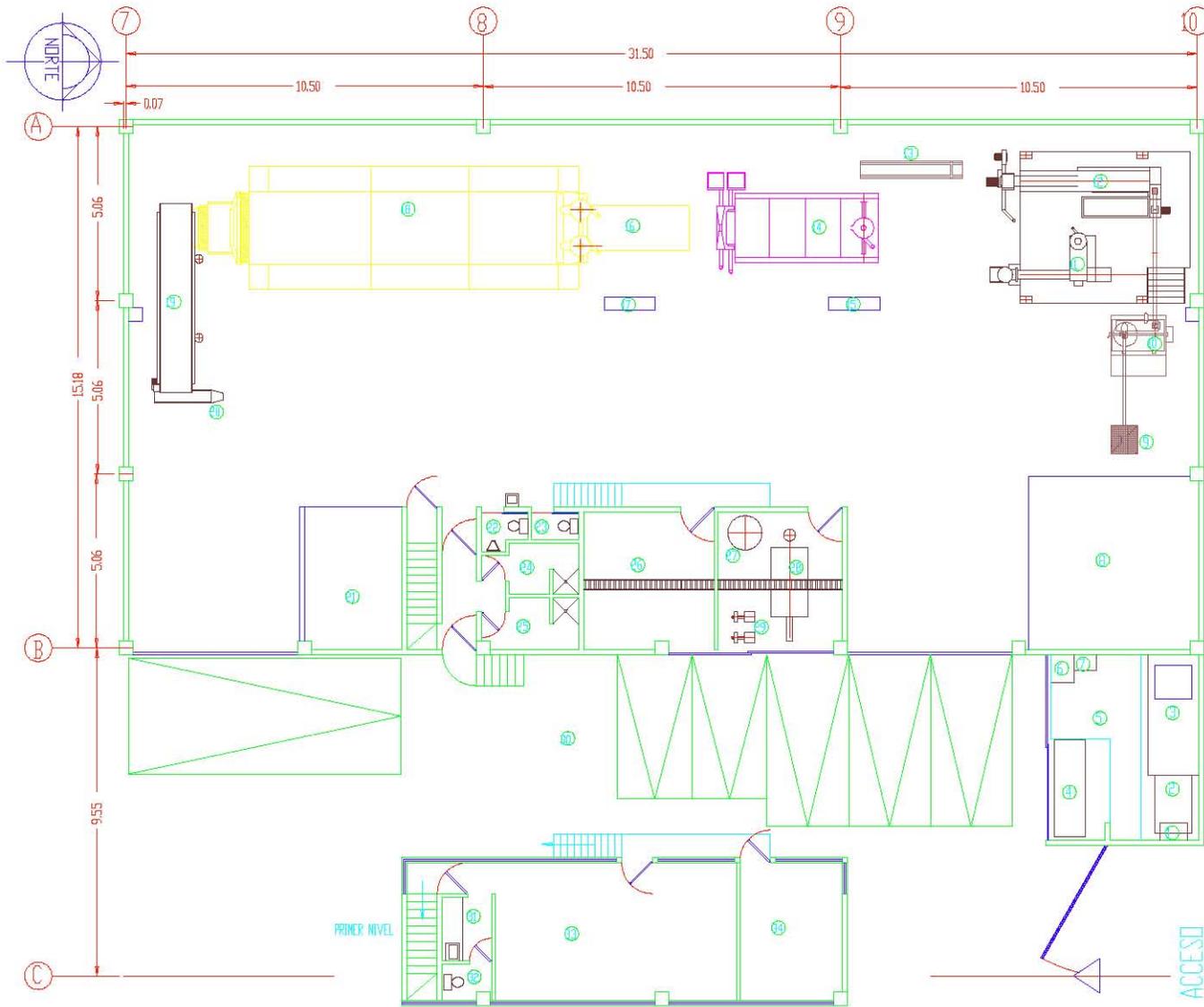
Corresponde a la Secretaría de Trabajo y Previsión Social por conducto de la Dirección General de Previsión Social dar los lineamientos y vigilar la instalación, la operación y el mantenimiento en condiciones de seguridad de los generadores de vapor y recipientes sujetos a presión, que se encuentren instalados o que se vayan a instalar, manifestando estos lineamientos en el Reglamento de Inspección de Generadores de Vapor y Recipientes Sujetos a Presión (Figura 5.3).

-Instalaciones eléctricas:

La elaboración y revisión de planos de las instalaciones de alta y baja tensión, referentes a la subestación, líneas de interconexión, diagrama unifilar, distribución general de alimentadores, distribución de alumbrado, contactos, fuerza, salidas especiales, planos de cuadros de motores, cuadros de carga de alumbrado, áreas peligrosas e instalaciones especiales se hará de acuerdo con lo estipulado en la Normas Técnicas de Instalaciones Eléctricas (NTIE) vigentes en la publicación de las Normas Oficiales Mexicanas, como se indica en el artículo transitorio 1 del Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.

Para la elaboración de todos estos cálculos se requiere de la colaboración de un perito de instalaciones eléctricas.

En las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 y en la Tabla 5.2 se presentan todos los resultados de esta fase.



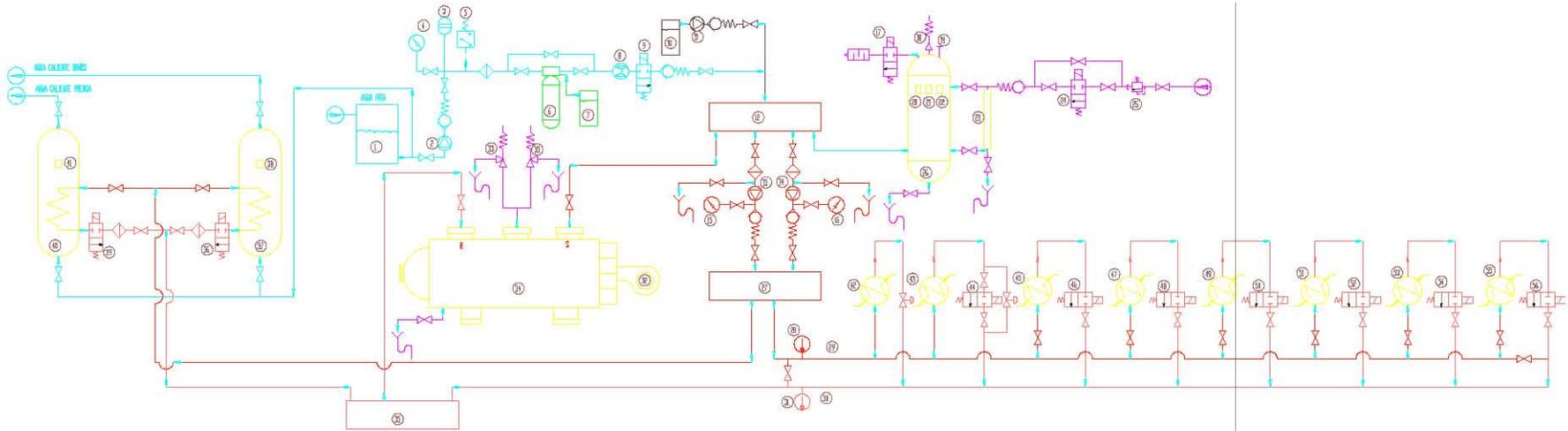
DESCRIPCION DE AREAS

- 1 TRANSFORMADOR DE ALTOVOLTAJE (500 Kg)
- 2 TRANSFORMADOR DE 23 Kv-480 VOLTS (1 Ton)
- 3 SUBESTACION (500 Kg)
- 4 PLANTA DE ENERGIA
- 5 RECIPIENTE PARA CALIBRADO DE ALI.
- 6 TALLER ELECTRICO DE INSTALACION (50 Kg)
- 7 TALLER ELECTRICO DE PLANTA DE ENERGIA (50 Kg)
- 8 ALMACEN DE MATERIA PRIMA (500 Kg/m²)
- 9 CAMARA DE MATERIAS PRIMAS
- 10 RECIPIENTES
- 11 EXTRACTOR FUMADOR (4 Ton)
- 12 EXTRACTOR COCCION (4 Ton)
- 13 EXTRACTOR DE TERNILLO (500 Kg)
- 14 TRAMPA (2 Ton)
- 15 TALLER ELECTRICO DE ESTRIBOS (500 Kg)
- 16 SECADOR (5 Ton)
- 17 TALLER ELECTRICO SECADOR (500 Kg)
- 18 PRECIBARRIO (5 Ton)
- 19 BANDA DE EMPALMADO (1 Ton)
- 20 BANDA DE REPASO (50 Kg)
- 21 ALMACEN DE PRODUCTO TERMINADO (2000 Kg/m²)
- 22 V.C. APPOSITO
- 23 V.C. VUELOS
- 24 RESERVOIRIOS VARIOS
- 25 RESERVOIRIOS VARIOS
- 26 TALLER DE MANTENIMIENTO
- 27 TALLER HERRAMIENTAS
- 28 COCINA (2 Ton)
- 29 BARRIO DE RECALCULACION
- 30 ZONA DE CARGA Y DESCARGA
- 31 COCINA DE LECCIONES
- 32 V.C. OFICINAS
- 33 OFICINAS
- 34 OFICINAS

CROQUIS DE LOCALIZACION



PASTAS Y PELLETS DE MEXICO SA DE CV.	
AREA:	BODEGAS EN CONDOMINIO
CONTENIDO:	PROCESO DE LA PLANTA
TITULO DE PLANO:	PLANO Y PELLETS A REDD SUE-01
DESCRPTIVO:	LOCALIZACION:
PROYECTO:	CLIENTE:
PROYECTANTE:	ESCALA:
DISEÑADO:	REVISADO:
FECHA:	PROYECTO: PYP[P-01]



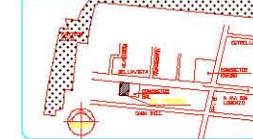
NOMENCLATURA

- 1- TANQUE
- 2- BOMBA DE ALIMENTACION
- 3- PULMÓN DE AIRE (40 LTS)
- 4- MANOMETRO PRESION DE ALIMENTACION
- 5- PRESOSTATO DE ALIMENTACION
- 6- TANQUE SUAVIZANTE DE AGUA
- 7- TANQUE DE SALMUERA
- 8- MEDIDOR PARA EL TOTAL DEL CAUDAL
- 9- ELECTROVALVULA 2/2 VIAS DE ALIMENTACION
- 10- TANQUE DE HIDRUXINA
- 11- BOMBA DE ALIMENTACION DE HIDRUXINA
- 12- CABEZAL DE SUCCION
- 13- BOMBA DE RECIRCULACION No 1
- 14- BOMBA DE RECIRCULACION No 2

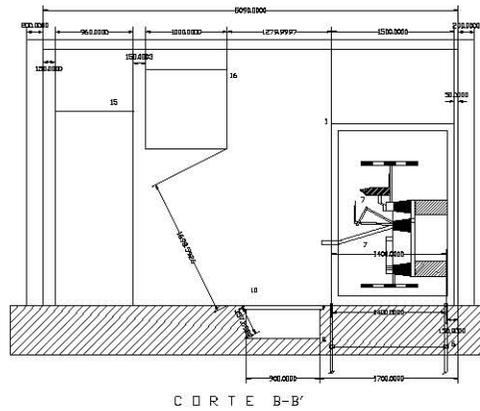
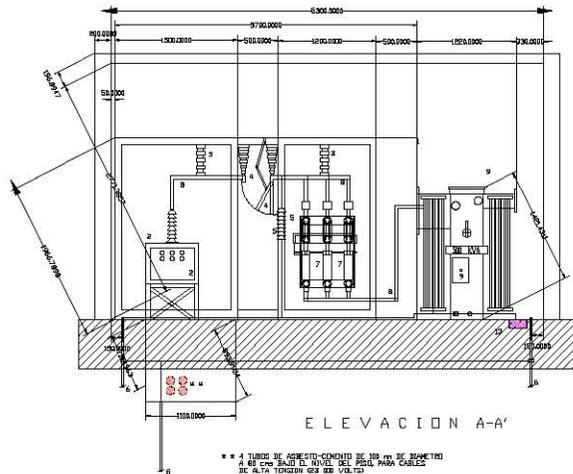
- 15.- MANOMETRO PARA PRESION DE RECIRCULACION No. 1
- 16.- MANOMETRO PARA PRESION DE RECIRCULACION No. 2
- 17.- ELECTROVALVULA DE EXPULSION DE AIRE
- 18.- VALVULA DE SEGURIDAD DE AIRE
- 19.- REGULADOR DEL NIVEL MINIMO DE ZONDA
- 20.- PRESOSTATO COMANDO DE LA VALVULA DE INYECCION DE AIRE (24)
- 21.- PRESOSTATO COMANDO DE LA VALVULA DE EXPULSION DE AIRE(17)
- 23.- NIVEL VISIBLE DE AGUA
- 24.- ELECTROVALVULA ADMISION DE AIRE
- 25.- REGULADOR DE PRESION ADMISION DE AIRE
- 26.- TANQUE DE EXPANSION
- 27.- CABEZAL DE SALIDA
- 28.- TERMOMETRO DE TUBERIA DE SALIDA
- 29.- TUBERIA DE SALIDA DE AGUA
- 30.- RETORNO DE AGUA
- 31.- TERMOMETRO DE RETORNO DE AGUA
- 32.- QUEMADOR
- 33.- VALVULA DE SEGURIDAD
- 34.- CALDERA
- 35.- CABEZAL DE RETORNO
- 36.- ELECTROVALVULA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE BANDS

- 37.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DE BANDS
- 38.- TERMOSTATO INTERCAMBIADOR DE CALOR BANDS
- 39.- ELECTROVALVULA INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA PRENSAS
- 40.- INTERCAMBIADOR DE CALOR PRENSAS
- 41.- TERMOSTATO INTERCAMBIADOR DE PRENSAS
- 42.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL TRABAO
- 43.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL PRESECADOR
- 44.- ELECTROVALVULA DEL INTERCAMBIADOR DEL PRESECADOR
- 45.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL SECADOR SECC.1 PISO.1
- 46.- ELECTROVALVULA DEL SECADOR SECC.1 PISO.1
- 47.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL SECADOR SECC.2 PISO.1
- 48.- ELECTROVALVULA DEL SECADOR SECC.2 PISO.1
- 49.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL SECADOR SECC.3 PISO.1
- 50.- ELECTROVALVULA DEL SECADOR SECC.3 PISO.1
- 51.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL SECADOR SECC.1 PISO.2
- 52.- ELECTROVALVULA DEL SECADOR SECC.1 PISO.2
- 53.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL SECADOR SECC.2 PISO.2
- 54.- ELECTROVALVULA DEL SECADOR SECC.2 PISO.2
- 55.- INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL SECADOR SECC.3 PISO.2
- 56.- ELECTROVALVULA DEL SECADOR SECC.3 PISO.2

CROQUIS DE LOCALIZACION

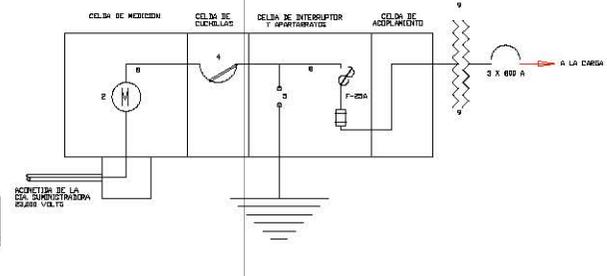


PASTAS Y PELLETS DE MEXICO SA DE CV.	
COPSA : BODEGAS EN CONDOMINIO	
INSTALACION HIDRAULICA GENERAL	
TIPO DE PLANO :	PROYECTO
HIDRAULICO	INDUS Y PELLETS DE MEXICO SA DE CV.
UNIONACION :	INDUS Y PELLETS DE MEXICO SA DE CV.
RESPONSABLE DE PROYECTO :	
ACTIVACIONES :	ESCALA :
SEÑAL :	REVISOR :
FECHA :	PYPCT-01

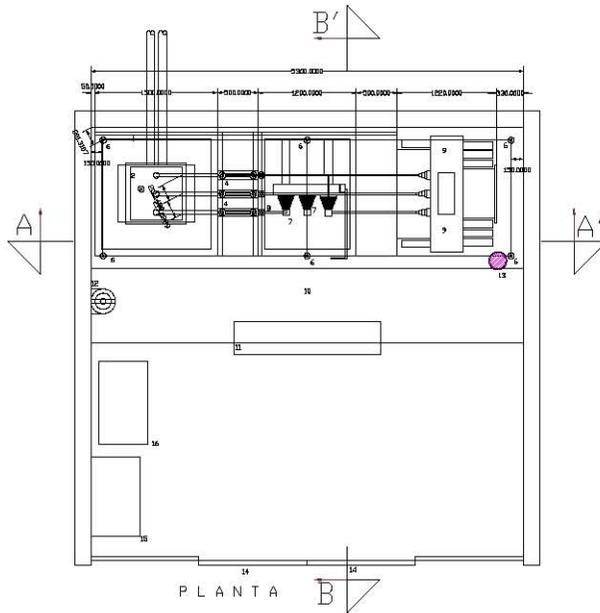


SUBSTACION ELECTRICA DE 500 KVA 23 KV 440/254 VOLTS

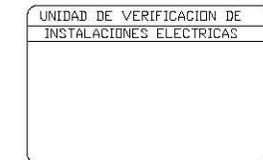
DIAGRAMA UNIFILAR



- NOTAS:**
- 1- ACOTACIONES EN CENTIMETROS
 - 2- SE DENTEN LAS PUERTAS DE LOS GABINETES PARA PODER CLAVARLOS DEL DENTADO
 - 3- LAS PUERTAS DE LA SUBESTACION CUENTAN CON UN SQUELETIVO QUE IMPIDE DE ABIRN CUANDO ESTE TRABAJANDO



EQUIPO Y MATERIAL EMPLEADO			
NO.	DESCRIPCION	MARCA	REG. DE CANT. EN TRINTE
1	SUBSTACION ELECTRICA UNIFILAR COMPACTA, TIPO INTERIOR 500 KVA CLASE 25 KV, 23 KV (MATERIA V), 3 FASES, 40 Hz, 400 V, 400 A	ELECTRIMEX	EN TRINTE
2	GABINETE METALICO FORMADO POR 4 SECCIONES DE LAMINA NO 38 Y MONTAJE ELECTROTECNICO ANTICORROSION	LEGSA	5338
3	EQUIPO DE MEDICION DE C.A. SUBESTACION PARA 23 KV	—	—
4	ASLADORES DE RESINA EPOXI 99-EN PARA 23 KV CLASE 25	MALTO	4313
5	CUCHILLAS SECCIONADAS DE SERVICIO 2 POLOS, 400 AMPER OPERANDO EN GRUPO MANUAMENTE Y SIN CARGA CLASE 25 KV	LEGSA	5862
6	APARATOS AUTOMATIZADOS CON SISTEMA DE NEUTRO A TIERRA PARA 23 KV	TUGA	3175
7	SISTEMA DE TIERRAS FORMADO POR CABLES DE COBRE SQUELETO CALIBRE 4/0 Y SILENA DE ALUMINO DE 300 mm x 3 mm, 20 VARILLAS CORROSION DE 3 mm DE DIAMETRO POR 15 mm DE SECCION, CONECTANDAS A TODAS LAS PARTES NO CONDUCTORAS DE EQUIPAMIENTO	CONDANIX	2864
8	INTERRUPTOR DE ALTA TENSION, 3 FASES, 400 AMPER 23 KV OPERANDO EN AIRE, EQUIPADO CON FUSIBLES DE ALTA CAPACIDAD INTERRUPTORA DE 800 MVA, CONECTADO CON FUSIBLES DE CONEXION INTERNA, DE 25 AMPER CON SQUELETIVO DE PROTECCION TRUQUER Y MECANISMO DE OPERACION EN GRUPO	BRIVIDA	2949
9	LINEA DE ALTA TENSION FORMADA CON SILENA DE ALUMINO DE 36 mm x 5 mm CLASE 25 KV, 200 A CORRIENTE NOMINAL	—	—
10	TRANSFORMADOR EN ACEITE DE 500 KVA, 23 KV AT, 440/254 V 3 FASES, 40 C.P.S., 40 Hz 2 CONEXION DELTA ESTRELLA	MECA	2536
11	TABLA AISLANTE CON PISO DE MALLE ESTEREA PARA 23 KV TABLA TRUQUER 15 mm DE ESPESOR	—	—
12	LAMPARA FLUORESCENTE DE 27 WATTS QUE SIDA ALIMENTADA DEL TABLERO DE DISTRIBUCION	PHILIPS	2825
13	EXTINGUIDOR DE INCENDIOS TIPO BOTELLA CON PULVO QUIMICO SISO 9 B C	—	—
14	BRINJALE PARA BIRNE DE ACEITE DEL TRANSFORMADOR EN CASO DE FUGA	—	—
15	LEVANTAS "ALTO VOLTAJE" Y "PROHIBIDO EL PASO"	—	—
16	INTERRUPTOR GENERAL EN AT. DE 3 X 800 AMPER	F.P.C.	5831
17	TRANSFORMADOR EN ACEITE DE 45 KVA, 440 V, 220/127 V, 3 FASES, 40 C.P.S., 40 Hz 2 CONEXION DELTA ESTRELLA	MECA	2930



PASTAS Y PELLETS DE MEXICO SA. DE CV.

OBRA: BODEGAS EN CONDOMINIO

CONTENIDO: SUBSTACION ELECTRICA 500 KVA

TIPO DE PLANO: ELECTRICO

PROYECTADO: PASTAS Y PELLETS DE MEXICO SA. DE CV.

REVISADO: []

RESPONSABLE DE PROYECTO: []

ACOTACIONES: ESCALA: 1:50

FECHA: SEPTIEMBRE 1994

PROYECTO: PYPJE-07

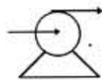
BOB # 0009

5.3.3. Descripción de los equipos

A continuación se dará una breve descripción de los equipos para el proceso de elaboración de productos extrudidos y los equipos de servicios auxiliares. La descripción se llevará a cabo clasificando los equipos de acuerdo a los fenómenos de transferencia involucrados, teniendo así equipos para: transferencia de cantidad de movimiento, transferencia de calor y transferencia de masa.

5.3.3.1. Transferencia de cantidad de movimiento

a) BOMBAS



Las bombas empleadas en la planta de productos extrudidos son bombas centrífugas empleadas en la instalación hidráulica general, en el suministro de agua del hidroneumático, en el sistema de recirculación de aceite térmico en el extrusor cocedor y en el sistema de recirculación de agua fría para el sistema de enfriamiento (“chiller”). En la elección de las bombas hay que considerar el medio que va a ser bombeado, el flujo o gasto, el incremento de presión, temperatura, presión interior y consumo de potencia. Además hay que especificar los materiales de construcción y el tipo de bomba. Las primeras cinco cantidades pueden extraerse directamente o deducirse de la información del diagrama de flujo mismo y del balance de materia del proceso. En general, la definición de los materiales de construcción y del tipo de bomba requieren de experiencia.

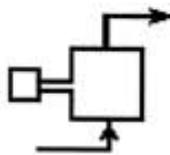
Proporcionando la diferencia de presión, densidad y eficiencia se puede especificar cada bomba e identificarla en un catálogo de ventas. En este paso debe tomarse en cuenta un factor final, la cabeza neta positiva de succión (con sus siglas en inglés NPSH). Ésta es, en efecto, la presión en la entrada de la bomba.

Uno de los efectos más destructivos en el servicio de las bombas centrífugas es la cavitación, esto es, la vaporización y recondensación de un fluido al mismo tiempo que experimenta rápida aceleración y desaceleración.

Para evitar la cavitación, la presión a la entrada de la bomba debe ser apreciablemente mayor que la presión de vapor del fluido. Esta presión mínima exacta (NPSH) está especificada por el fabricante de la bomba y debe tenerse en la entrada de la misma.

En el diseño preliminar en general, no es necesario especificar la “NPSH”, pero debe tomarse en cuenta esta limitación, de manera que se puedan colocar las bombas físicamente en elevaciones bajas o conceptualmente en el diagrama de flujo en donde debe estar siempre disponible la presión adecuada de entrada.

b) COMPRESORES



Los compresores forman parte de los transportadores de gases o vapores (incluyendo ventiladores, sopladores, compresores, eyectores, extractores, bombas de vacío, etc.) y son mecánica y teóricamente análogos a las bombas de líquidos. Las diferencias principales consisten en los volúmenes específicos, que son mucho mayores y la viscosidad que, generalmente, es mucho menor para los gases y vapores. En consecuencia, los transportadores de gases y vapores son mucho más grandes, tienen tolerancias menores, operan a velocidades mayores y requieren más mantenimiento, consumen más potencia y son mucho más caros que las bombas de líquidos que operan con flujos de masa similares y presiones diferenciales. Los parámetros necesarios para la especificación de un transportador de gases y vapores son los mismos que para las bombas. Los compresores, al contrario de los sopladores, operan en intervalos de presión y con relaciones de compresión que, a menudo, requieren enfriamiento externo para evitar daño a los sellos sensibles y a las superficies de metal.

En el diseño de una planta de *extrusión*, se necesitan dos compresores:

El primero es un compresor de aire para los servicios de aire comprimido. Es un compresor reciprocante que tiene un pistón que se mueve hacia delante y hacia atrás dentro de un cilindro, unas válvulas sincronizadas con el movimiento del pistón controlan el flujo de gases hacia adentro y hacia fuera del cilindro.

El segundo es un compresor para el agente refrigerante del sistema de enfriamiento de agua.

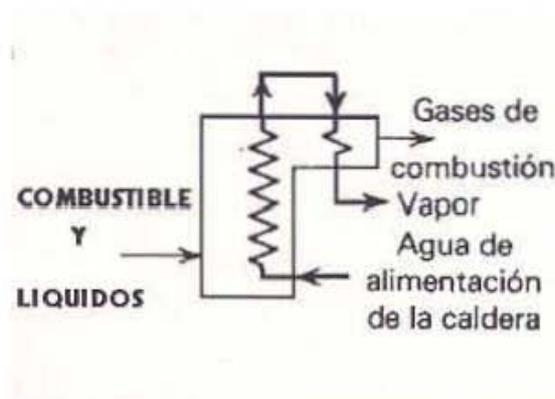
c) MEZCLADORES

En la planta de *extrusión* se utiliza un mezclador de sólidos de listón para poder homogeneizar la harina con otros ingredientes sólidos también, antes de entrar la mezcla homogénea en el acondicionador que la humedecerá y la amasará previamente a la entrada del extrusor.

5.3.3.2. Transferencia de calor

El equipo para proceso de calor u hornos es una categoría que incluye calderas, calentadores, incineradores, estufas y generadores de vapor. Este equipo proporciona calor de manera conveniente, eficiente y a la temperatura requerida. Se aplica calor quemando combustible directamente en una corriente o recipiente de proceso (calentadores a fuego directo). En los hornos de fuego indirecto el medio de calentamiento está separado de las corrientes del proceso. Los términos calderas y generadores de vapor se usan como sinónimos.

a) CALDERA

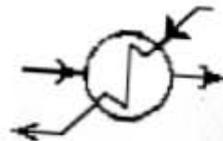


El medio más común para proporcionar el calor requerido en los procesos de las plantas industriales es el vapor o agua sobrecalentada, debido a su bajo costo, limpieza y gran tasa de transferencia de calor. Para disminuir la corrosión y la incrustación, generalmente el agua de alimentación de la caldera lleva un tratamiento y se desmineraliza. La economía de operación dictamina, por tanto, que el agua condensada, conocida como “condensados”,

se recircule siempre que sea posible. En los circuitos cerrados de la caldera de proceso es común tener 70 a 90% de recirculación de condensados. Las calderas industriales son de dos tipos: las unidades llamadas tubos de humo y las calderas de tubos de agua.

La caldera de la planta de *extrusión* es una caldera de tubos de humo, que es similar a los intercambiadores de calor de tubos y envolvente, donde los gases de combustión fluyen a través de los tubos. El tubo central del “paquete” más grande que el resto, comprende la cámara de combustión. El flujo se invierte al final del “paquete” y regresa a través de numerosos tubos externos más pequeños. Las calderas de tubos de humo son eficientes y compactas. La presión del vapor está limitada por la resistencia del gran envolvente cilíndrico. Esta resistencia es, por supuesto, menor de lo que podrían tener los tubos pequeños. Por esto, las calderas de tubos de humo se emplean principalmente para generar cantidades modestas de vapor saturado de baja presión. A causa de su geometría, la cámara de combustión y las tuberías del gas no son compatibles con la limpieza continua. Esto, además de un tiempo limitado de permanencia de la combustión, restringe las calderas de tubos de humo a combustibles que no sean más sucios o menos convenientes que el petróleo residual (conocido como combustóleo).

b) INTERCAMBIADORES DE CALOR



Los intercambiadores de calor son importantes y omnipresentes en la industria de los procesos químicos, ya que son instrumentos fundamentales para la conservación y transferencia de energía. Los tipos de intercambiadores de calor son limitados y de diseño estándar lo que permite una fácil caracterización y descripción. Existen los siguientes tipos como los principales:

1.- Intercambiadores de calor de doble tubo

Conceptual y mecánicamente, el intercambiador de calor de doble tubo indudablemente es el más conocido y el más simple. Consiste en un tubo insertado concéntricamente dentro de otro más grande (el envolvente). Uno de los fluidos pasa a través del anillo (lado del envolvente) mientras que el otro

pasa a través del tubo central (lado del tubo). El calor es intercambiado por transferencia a través de la pared del tubo interior. En su uso comercial, estos intercambiadores llegan a ser excesivamente incómodos y costosos conforme aumenta su tamaño. De este modo se limitan a un área aproximadamente de 10m^2 .

2.- Intercambiadores de envolvente y tubo

Una alternativa lógica para incrementar su superficie de transferencia de calor es colocar múltiples tubos pequeños dentro de un envolvente sencillo. Ésta es la configuración más común de los intercambiadores de calor. Algunas propiedades inherentes al diseño mecánico son, por ejemplo, las presiones grandes en su interior se pueden contener de manera más barata en los tubos de diámetro pequeño. De este modo, se puede acomodar fácilmente una corriente de alta presión en el lado del tubo de una unidad de envolvente y tubos. Como adentro de los tubos (si es que hay un fluido corrosivo) lo que está expuesto únicamente son los tubos mismos y los extremos de las cámaras, éstas últimas pueden construirse de aleaciones especiales, en tanto que el envolvente puede hacerse de material convencional barato. Si en la parte interior de los tubos se acumulan incrustaciones o depósitos, las cubiertas de los extremos pueden quitarse fácilmente y pueden introducirse barras de limpieza a través de ellos. Si alguno de los tubos se rompe o falla puede desconectarse o retirarse y reemplazarse fácilmente con sólo haber quitado las cubiertas de los extremos.

3.- Intercambiadores de placa y espiral

Para fluidos moderadamente viscosos se pueden lograr coeficientes mayores de transferencia de calor forzando el fluido a través de espacios entre placas paralelas corrugadas. Las placas están montadas y espaciadas de manera muy parecida a los elementos de los filtros prensa y pueden limpiarse fácilmente a mano. Los intercambiadores de placas planas son atractivos económicamente cuando ambos fluidos dictaminan materiales de construcción caros y exóticos. No son adecuados para el servicio de alta presión a causa de la resistencia limitada de las grandes superficies planas. Para reducir el costo y obtener simplicidad mecánica, las placas se pueden enrollar para formar pasajes de flujo a contracorriente de configuración especial. Las placas de los extremos pueden retirarse para tener un acceso fácil y también para su limpieza y en estas unidades pueden utilizarse metales resistentes a la corrosión bastante económicos. Son atractivos por su servicio de capacidad pequeña con fluidos

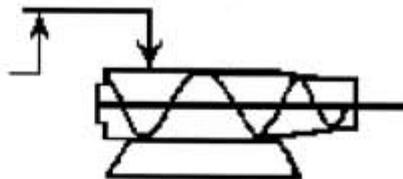
viscosos, corrosivos, “sucios” y que forman incrustaciones, pero tienen limitaciones en la presión.

En la planta de *extrusión* se tienen los siguientes intercambiadores:

- Un intercambiador de aceite térmico para el extrusor, calentado por resistencias y enfriado por agua.
- Un intercambiador para enfriar el aceite de los reductores
- Dos intercambiadores que forman parte del secador con vibración (“trabato”) en el secado de producto.
- Cuatro intercambiadores que forman parte del presecador.
- Seis intercambiadores que vienen integrados en el secador.
- Un intercambiador para calentar el agua que entra en la tina mezcladora del extrusor.

5.3.3.3. *Transferencia simultánea de momento, calor y masa*

a) EXTRUSORES



Los extrusores son máquinas con múltiples ventajas, tal como ya se ha explicado a lo largo de este trabajo. Así mismo sus funciones, clasificación, diferentes tipos y características ya han sido mencionadas con anterioridad.

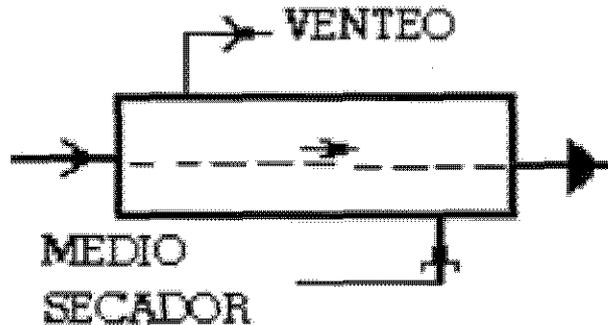
En la planta de *extrusión* se tienen dos tipos de extrusores:

- i. extrusores-cocedores con un solo tornillo, calentadas las dos primeras secciones o estadios con aceite térmico y enfriando la última sección con agua

- ii. extrusores formadores de un solo tornillo enfriados con agua y calentados con resistencias eléctricas.

Las Tablas 5.3 y 5.4 presentan las condiciones y características de los extrusores usados para botanas y los factores comunes para el escalamiento de extrusores de tornillo simple.

b) SECADORES



El secado de los alimentos es la extracción deliberada del disolvente (en este caso agua) que contienen. La operación involucra la evaporación del agua por adición de su calor latente de vaporización y su remoción. Por tanto, en la operación de secado intervienen dos factores:

- a) Transmisión de calor, para suministrar el calor latente de vaporización necesario
- b) Movimiento del agua o vapor de agua a través del producto alimenticio y su separación del mismo.

En la Sección 2.6.3 se discutieron los diferentes procesos de secado y, recordando que los tipos principales de secadores son: secadores de bandejas o charolas, secadores de túnel, secadores de rodillos o de tambor, secadores de lecho fluidificado, secadores neumáticos, secadores rotatorios, secadores de canal, secadores de tolva, secadores de cinta, secadores por vacío y secadores liofilizadores, se seleccionaron los idóneos.

En la planta de alimentos extrudidos se emplearon secadores de tipo de túnel por contacto con aire a presión atmosférica en los que se transmite calor a los alimentos extrudidos mediante aire que se calienta por medio de los intercambiadores de calor que el secador tiene integrados.

Tabla 5.3. Condiciones y características de extrusores de alimentos para botanas de “pellets”⁽⁵⁴⁾

	<u>Extrusores formadores</u>	<u>Extrusores tornillo simple baja fricción</u>	<u>Extrusores doble tornillo baja fricción</u>
Humedad alimentación(% bh)	25 – 40	25 – 42	18 – 95
Humedad producto(% bh)	hasta 40	23 – 40	hasta 95
Formado de producto	muy bueno	limitado	bueno
Velocidad rotación tornillo (rpm)	20 – 50	20 – 120	hasta 200
Intervalo formulaciones	limitado	muy amplio	muy amplio
Temperatura barril(°C)	hasta 80	50 – 160	50 – 200
Hidratación automática y control temperatura	limitada	bueno	bueno
Desgaste	limitado	limitado	alto
Costo relativo planta	mediano	mediano	alto

Tabla 5.4. Resultados de factores comunes para el escalamiento de extrusores de tornillo simple ⁽⁶³⁾

Parámetro	Extrusor pequeño	Extrusor grande
Diámetro	D_1	D_2
Ancho canal	W_1	$W_2 = W_1(D_2/D_1)$
Profundidad canal	H_1	$H_2 = H_1(D_2/D_1)^{0.5}$
Velocidad tornillo	V_1	$V_2 = V_1(D_2/D_1)^{0.5}$
Esfuerzo cortante	γ_1	$\gamma_2 = \gamma_1$
Tiempo residencia	t_1	$t_2 = t_1(D_2/D_1)^{0.5}$
Velocidad transporte sólidos	M_{s1}	$M_{s2} = M_{s1}(D_2/D_1)^2$
Capacidad fusión	M_{p1}	$M_{p2} = M_{p1}(D_2/D_1)^{1.75}$
Velocidad transporte material fundido	V_1	$V_2 = V_1(D_2/D_1)^2$
Consumo de energía	Z_1	$Z_2 = Z_1(D_2/D_1)^{0.5}$

El proceso de secado de estos productos incluye tres etapas:

1.- “TRABATO”. Remoción de la humedad de los productos de aproximadamente un 35 a un 25% mediante corrientes de aire intensas, alta

temperatura y producto sujeto a vibración mecánica y corto tiempo de residencia dentro de este equipo.

2.- PRESECADOR. En esta etapa se baja la humedad de los productos extrudidos de aproximadamente 25 a 15% con condiciones de temperatura similares al anterior, pero con corrientes de aire menos intensas, sin vibración mecánica y tiempos de residencia mayores.

3.- SECADOR. La humedad se baja del 15 al 10% aproximadamente (según el producto requerido) y esta etapa tiene condiciones más suaves de temperatura y velocidad del aire, pero los tiempos de residencia son los mayores.

Como puede observarse en los planos y descripción de párrafos arriba, la operación unitaria de freído no está considerada ya que la planta se concibió en esta etapa solamente para obtener el producto listo para freirse, el cual se vende a los clientes que lo fríen y expenden directamente permitiéndoles vender un producto recién freído.

A continuación se mencionan los otros equipos requeridos para el proceso de obtención de productos extrudidos de trigo.

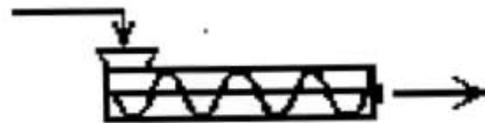
5.3.3.4. Otros equipos

Otros equipos adicionales que brindan servicios importantes en la planta de extrusión son:

a) TRANSPORTADORES

El equipo de transportación y alimentación de sólidos, disponible con modificaciones y variaciones muy numerosas, se pueden clasificar en siete grandes categorías: De bandas articuladas, tornillo sinfín, banda, cangilones, flujo continuo (cadenas, aletas), neumáticos y vibratorios. Se dará una breve descripción de los transportadores usados en la planta de *extrusión*.

a.1)Transportador de tornillo sinfín



Este dispositivo, también conocido como transportador helicoidal, emplea un tornillo giratorio para transportar sólidos a través del espacio o

ducto cerrado. Puede transportar sólidos pegajosos y gomosos bajo una gran variedad de condiciones, en atmósferas controladas y con transferencia simultánea de calor. Sin embargo, esta clase de transportadores están limitados en su diámetro. La capacidad también está controlada por el tamaño y la abrasividad de los materiales que transporta.

En la planta de los productos extrudidos se tiene uno de estos transportadores para alimentar la mezcla sólida de la mezcladora de sólidos al extrusor.

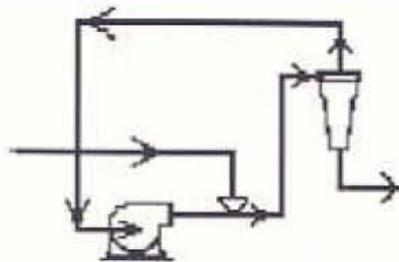
a.2) Transportador de banda



Consiste en una banda continua, flexible, que pasa sobre rodillos y es impulsada a través de rodillos de potencia; existen transportadores de banda que trabajan a velocidades de varios metros por segundo. Pueden transportar una amplia variedad de materiales excepto los que se adhieren a la banda.

En el proceso descrito en el presente trabajo, hay un transportador de bandas en los secadores y otro que transporta el producto final seco y sirve de enfriamiento del mismo ya que está expuesto al ambiente y permitirá el envasado del producto seco ya frío.

a.3) Transportador neumático



Cuando las características del material lo permiten, los transportadores neumáticos son comunes por su gran volumen de transportación de sólidos a través de distancias considerables, tanto horizontales como verticales. Estas unidades emplean una corriente de gas (aire) de gran velocidad para arrastrar sólidos y conducirlos a través de un ducto de manera muy parecida a como se bombea un fluido. Como el producto es pegajoso, este tipo de transporte es ideal. Son flexibles, compactos y baratos y requieren relativamente poco mantenimiento. Sin embargo, es necesario efectuar un diseño a prueba de fugas del gas que permita la operación en atmósferas controladas o bajo presión. El uso de vacío está limitado, ya que es esencial una fase modesta de gas denso para transportar sólidos. Los sólidos abrasivos o de gran tamaño no

son compatibles con esta clase de unidades. El control del polvo es integral y necesario en este tipo de transportadores.

En la planta se cuentan con transportadores neumáticos para el producto que es llevado entre extrusores, luego del extrusor hacia el “trabato” y del “trabato” al presecador.

5.4. Arranque de una planta de extrusión

Para el arranque de esta planta de extrusión se comenzó con las pruebas de funcionamiento de cada uno de los equipos, ya descritos con anterioridad, realizadas de forma individual, verificando en cada uno los siguientes puntos: Protecciones eléctricas, electrónicas, mecánicas y de seguridad y la calibración de los instrumentos.

Entre algunas de las protecciones eléctricas que se verificaron se pueden mencionar las siguientes: Que se tuvieran los fusibles adecuados, la programación y calibración de inversores de frecuencia para motores, las protecciones térmicas adecuadas, los sistemas de tierra física, etc.

Dentro de las protecciones mecánicas se revisaron: Los fusibles mecánicos, la calibración de limitadores de torque, los niveles de aceite, la tensión y alineamiento de bandas, cadenas y transmisiones en general, el correcto apriete de los tornillos, el alineamiento de bandas transportadoras, etc.

Posteriormente, se verificó que en todas las zonas de riesgo que se encuentren en los diferentes equipos, se tuvieran las “guardas” de seguridad necesarias como son las cubiertas en cadenas, bandas, calefacción, válvulas de seguridad, etc., para evitar posibles accidentes.

Se verificó que todos los “microswitches” de seguridad de los equipos funcionaran correctamente.

Asimismo, se supervisó la colocación de todos los letreros con indicaciones de seguridad, ya que es otro punto muy importante para empleados y personal, en general, por lo que se verificó que estuvieran en los lugares convenientes.

El orden como se realizaron las verificaciones mencionadas anteriormente, fue el siguiente:

- Servicio y equipos auxiliares.

- 1.- Equipo de suministro eléctrico (subestación)
- 2.- Equipo contra incendios
- 3.- Equipo de suministro de agua
- 4.- Equipo de suministro de agua caliente (calderas)
- 5.- Equipo de enfriamiento de agua (“chiller”)

- Equipos del proceso

Además de realizar todas las verificaciones anteriormente mencionadas, en los equipos del proceso, que se enumeran a continuación, se establecieron las primeras condiciones para el arranque de los mismos.

Las variables de tiempo de residencia, temperaturas, presiones, humedades, velocidad rotacional (rpm), amperaje, etc., fueron establecidos de acuerdo con las especificaciones dadas por los fabricantes de equipos y las condiciones óptimas observadas en la parte del estudio realizado a nivel de laboratorio, sobre todo en lo que se refiere a las condiciones de humedad inicial para la mezcla que entra al extrusor cocedor, la humedad del producto que sale del formador, la humedad final del producto al finalizar el secado y las primeras condiciones de temperaturas para la extrusión.

Los equipos del proceso que se verificaron con todas las condiciones mencionadas, y a los cuales se les dan las primeras condiciones de arranque de las variables señaladas son:

- 1.- Mezcladoras

- 2.- Transportadores helicoidales
- 3.- Amasadora
- 4.- Extrusor cocedor
- 5.- Extrusor formador
- 6.- Secador vibratorio (“trabato”)
- 7.- Presecador
- 8.- Secador
- 9.- Banda de enfriamiento
- 10.- Envasadoras

Una vez verificados los puntos mencionados en cuanto a protecciones y calibración de instrumentos se refiere y establecidas las condiciones iniciales de arranque para cada equipo, se procedió al arranque, para lo cual se tenía lista la mezcla de ingredientes. Dicha mezcla se preparó con la formulación de los ingredientes, y sus respectivas proporciones, estudiadas en la primera parte de este proyecto.

Así, la harina pastelera, junto con el almidón y los ingredientes menores estudiados, se utilizaron en la fórmula inicial en el arranque de la planta de extrusión. Esta fórmula se ha ido variando en los meses subsiguientes según han sido las necesidades de los clientes para el producto que ellos desean.

Cuando todo el equipo estuvo verificado para funcionar en las condiciones adecuadas y se habían establecidos las variables de proceso en cada etapa, se procedió al arranque. El punto siguiente fue tratar de estabilizar las condiciones de operación y observar el proceso, ya que como el resultado final no puede evaluarse sino hasta haberlo concluido y esto se da hasta después de, por lo menos, 6 horas de haberse iniciado, es necesario ir tomando notas de los pasos intermedios.

En el momento que comienza a salir producto del secador y entra a las bandas de enfriamiento, apenas puede tenerse una primera idea, no es muy

precisa, en lo que a resultados finales de producto se refiere, ya que se requiere de la evaluación del producto terminado. Para ello, es necesario esperar un tiempo para la estabilización del producto a fin de poder someterlo a las pruebas descritas en la fase de laboratorio, como son la expansión, la determinación de humedad, la absorción de aceite, etc. Una vez realizadas las pruebas de laboratorio, es cuando puede concluirse si el proceso se llevó a cabo exitosamente o no. Así, comienzan una serie de pruebas de ensayo-error pues es muy difícil de primera instancia establecer las condiciones ideales para el funcionamiento del equipo y la obtención del producto deseado.

Durante el arranque se llevó una bitácora detallada de cada paso del proceso, para registrar la lectura de los instrumentos de medición con diferentes condiciones de operación que se van variando.

El punto de comparación se tiene al evaluar los resultados de laboratorio de los diferentes productos que se obtienen con diferentes variables de operación que se han de tener registrados en la bitácora a lo largo de todo el tiempo de pruebas. Así, se verifican las diferentes humedades, formulaciones, temperaturas, etc., pero cambiando una sola de las variables a la vez.

Como puede concluirse, el camino para encontrar las condiciones estables del proceso es técnica y económicamente complicado. La modificación de variables debe realizarse de uno por uno y más o menos, cada 30 min. Así se van tomando diferentes muestras, las cuales se evaluaron en el laboratorio.

Una vez que se logró estabilizar los equipos y el proceso y que se obtuvo el producto deseado, se sacaron las curvas de secado para ese producto, con los datos correspondientes desde que el producto entra en el secador vibratorio (“trabato”), luego cuando entra al presecador y, por último, al secador. Estas curvas se muestran en las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 y sirven para llevar un control riguroso del proceso de secado para garantizar una calidad uniforme en los productos.

5.5. Discusión final

5.5.1. Experimentos de laboratorio

- La selección del tipo de harina óptimo para elaborar los “pellets” fue el primer paso a seguir en el desarrollo del proceso. La harina de trigo fue

seleccionada entre las harinas de otros cereales, primeramente por su fácil disponibilidad, costo accesible, valor nutrimental (sección 2.1.2.), pero sobre todo, por sus características de formar una masa plástica, suave y elástica, gracias a sus principales compuestos (almidón y gluten) y que al ser sometida al proceso de extrusión, con calor y trabajo mecánico, se puede crear una estructura reformada y expandible tal como se describe en el Capítulo 2. El estudio de diferentes harinas de trigo es una parte importante y muy interesante ya que se constató que, aunque las harinas provengan del mismo cereal, poseen propiedades diferentes entre sí. Así, características distintas como la tenacidad, extensibilidad, porcentaje en proteínas, contenido en cenizas, entre otras, dan productos diferentes al elaborar las botanas. Las pruebas realizadas en el laboratorio permitieron analizar los diferentes tipos de harinas y evaluar los productos obtenidos. Los mejores resultados se obtuvieron, a nivel de laboratorio, con harina pastelera, ya que es una harina bien equilibrada por ser tenaz, pero también extensible, con bajo contenido de cenizas y porcentaje de proteína más bajo que las harinas panaderas y galleteras (ver Apéndice B), que hace que la masa sea suave pero al mismo tiempo elástica. Desde el punto de vista de la textura, un aspecto importante en el desarrollo de un nuevo producto tipo botana es el gluten y sus características y propiedades fueron estudiadas (secciones 2.2.2, 2.2.3, 2.5) a fin de comprender lo que pasa con la masa y sus componentes a la hora de ser sometidos al proceso de *extrusión*.

- En cuanto al proceso de *extrusión*, se observó que la velocidad del tornillo sinfín (rpm) influye determinantemente en cuanto a la expansión y absorción de aceite de los productos obtenidos. En las pruebas realizadas a diferentes rpm, hubo una disminución en el grado de expansión y un aumento en la absorción de aceite al aumentar la velocidad de giro del tornillo del extrusor (rpm) y esto se tradujo en productos de menor calidad. Esto se debe a que al aumentar la velocidad de rotación del tornillo se puede causar la ruptura de las moléculas “nativas” y este daño al almidón y proteínas reducen la capacidad de formar una matriz elástica (sección 2.6.2.3). El tiempo de residencia dentro del extrusor tiene que ver precisamente con la velocidad rotacional. Un tiempo de residencia menor, habla también de la calidad del producto en cuanto a su tiempo de cocción real y del intervalo a que se somete el producto a una temperatura elevada que promueve los cambios fisicoquímicos de la masa.

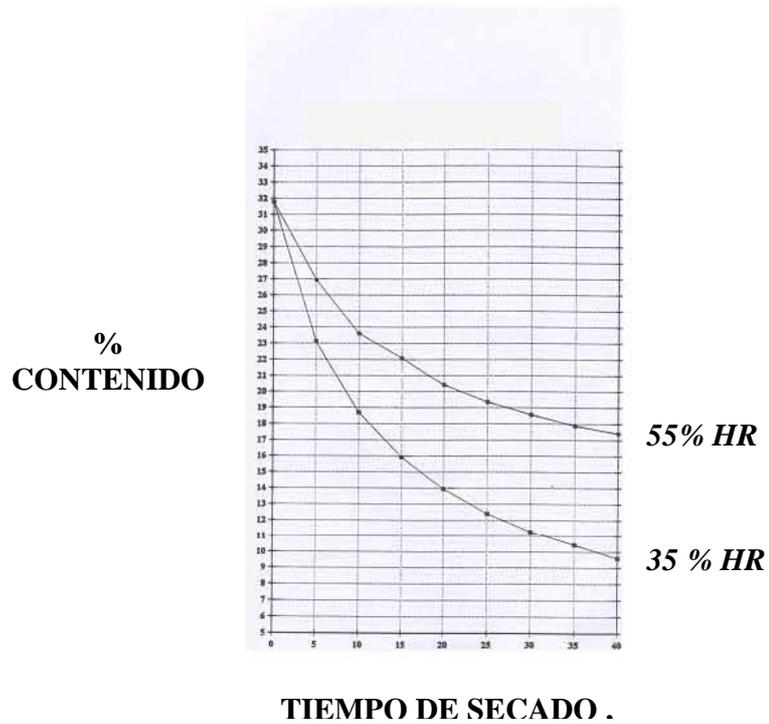


Figura 5.7. Efecto de humedad relativa en el secador de “pellets” (Temperatura y velocidad del aire constante)



Figura 5.8. Efecto de la temperatura en secado de “pellets” (HR constante y velocidad de aire constante)

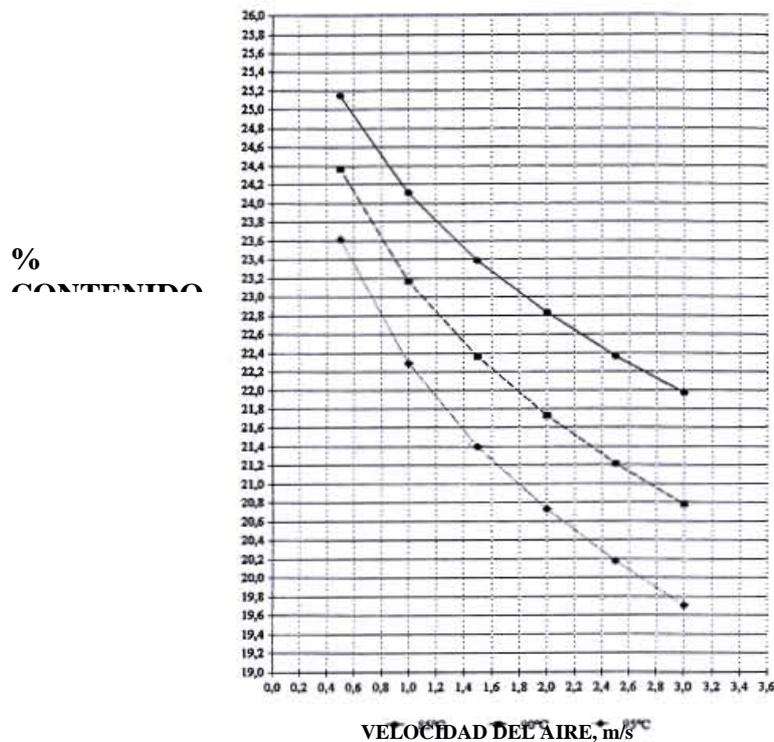


Figura 5.9. Efecto de la velocidad del aire en el secado de “pellets” (temperatura variable)

- El método utilizado para evaluar la textura, aunque proporcionó información, no fue el más adecuado para observar el comportamiento de los productos bajo diferentes condiciones de extrusión, ya que se observaron diferencias significativas de los datos obtenidos para las variables estudiadas por este método. El equipo está diseñado para masas suaves y como los productos se endurecen al someterlos al proceso de secado, el método no es el mejor.
- La humedad es una variable determinante y sensible en el proceso. Pudo constatar que al aumentar la humedad, la expansión del producto aumenta (Figura 4.1), ya que los efectos de temperatura, presión y fuerza de cizalla dañan en menor proporción a las moléculas. Sin embargo, el porcentaje de humedad debe tener un valor máximo, después del cual, si

se sigue incrementando, se pierde el equilibrio de valores óptimos de las variables de proceso.

- El porcentaje de almidón fue otro factor decisivo en la calidad de los productos, ya que se observó un aumento en la expansión del producto al aumentar el contenido de almidón en la fórmula (el aumento de la proporción de almidón también es limitado, ya que debe tomarse en cuenta el aumento de la viscosidad de la masa, dando como resultado una difícil operación y control del equipo de *extrusión*). Las características químicas del almidón y su forma de interactuar con las proteínas se discuten en el Capítulo 2, sección 2.2.1.
- El control de la temperatura es muy importante, ya que temperaturas en exceso se traducen en masas extrudidas cuyas estructuras moleculares se deterioran a causa de un incremento en la fricción y por lo mismo la expansión disminuye. La gelatinización del almidón se ve afectada porque, un exceso en temperaturas, puede causar la dextrinización del polisacárido y por consiguiente, problemas técnicos al “quemarse” el producto dentro del extrusor.
- Debido a la cantidad de proteína presente en la materia prima, sería interesante ahondar un poco más acerca de los cambios químicos de las proteínas y relacionarlos con la calidad de los productos. Esto no es simple ya que requeriría de estudios a nivel molecular que caen fuera de los intereses y, sobre todo, de los alcances de esta investigación.
- La evaluación sensorial arrojó como resultado final la conveniencia de adicionar algún saborizante para mejorar la aceptación del producto en el público consumidor. El producto fabricado mediante esta técnica, como producto de “tercera generación”, es muy versátil y puede adicionarse de una infinita variedad de sabores y ser enriquecido con otro tipo de compuestos como son las vitaminas.

5.5.2. Industria

- El escalamiento de los resultados de laboratorio a nivel industrial fue un poco más complicado, puesto que aquí había que considerar otras variables, como los costos y la facilidad de obtener materias primas de características homogéneas de manera constante. Las harinas de tipo

pastelero, generalmente son más caras y no tienen un uso tan generalizado y común, como la harina panadera y galletera.

- Las modificaciones posteriores a la formulación se han dado según los requerimientos y las necesidades que los clientes formularon al recibir los productos extrudidos y freírlos para obtener el producto listo para su consumo.
- Las variables del proceso a escala industrial (también estudiadas a escala de laboratorio) fueron:
 - Humedad de ingredientes y su punto de aplicación
 - Preacondicionamiento de ingredientes o mezclas
 - Control de pH de ingredientes o mezclas
 - Control de velocidad rotacional durante la *extrusión*
 - Control de temperaturas en las diferentes partes del extrusor
 - Control de las relaciones de tiempo/temperatura en cada sección del extrusor
 - Selección de tamaños y formas de los componentes del sistema
 - Selección adecuada de boquillas
 - Selección y control adecuado de los secadores en sus tiempos de residencia, temperaturas y niveles de humedad
 - Punto y método de aplicación del sabor
 - Selección adecuada del procesamiento posterior al secado para la elaboración final del producto
- Para encontrar los valores más adecuados para todas las variables mencionadas en el punto anterior y utilizarlas en los equipos a escala industrial, se requirieron múltiples pruebas. Es importante mencionar que, con el transcurso del tiempo, éstas vuelven a modificarse para adaptar el producto de acuerdo a las demandas del consumidor.
- El porcentaje de almidón, determinado como óptimo a nivel laboratorio, sirvió de base en el desarrollo del producto a nivel industrial. Se realizaron diferentes pruebas, con algunas modificaciones en la formulación para adaptarse a las condiciones de operación del equipo industrial. Estas pruebas no se llevan a cabo de igual manera a como se hicieron a nivel laboratorio, porque los costos a estos niveles lo impiden.
- Las grasas o aceites pueden ser usadas por sus propiedades lubricantes de manera diferente a su función en la elaboración de pan. En productos

extrudidos el aumento en la cantidad de grasa reduce la temperatura de *extrusión*. La grasa divide y liga a las enzimas, las cuales son desnaturalizadas o desactivadas durante la *extrusión*. Esto imparte la estabilidad oxidativa a los lípidos en el producto extrudido. Se realizaron algunas pruebas considerando algún tipo de grasa en la formulación, pero el efecto no fue tan importante y se optó por no experimentar más al respecto.

- Puede decirse que el arranque y el alcance de condiciones estables se lograron exitosamente gracias a la planeación cuidadosa de todas y cada una de las etapas consideradas y al apoyo técnico de todos los actores del proceso.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

De acuerdo con el objetivo de esta investigación, que fue el de evaluar la producción de alimentos extrudidos de trigo, tipo botana, elaborados a partir de diferentes harinas y formulaciones a nivel de laboratorio, así como aplicar esos resultados a nivel industrial, comparando el efecto de diferentes condiciones de *extrusión* por medio de pruebas fisicoquímicas y de textura a fin de conocer su influencia en las características de los producto y el efecto de las diferentes harinas y las variaciones de formulaciones por medio de pruebas fisicoquímicas y de textura y buscando el producto más aceptado por el consumidor por medio de un análisis sensorial con el mejor tipo de harina y la proporción de almidón óptima (formulación ideal), pueden concluirse diferentes aspectos para los resultados obtenidos a nivel de laboratorio.

Asimismo, como el objetivo particular de las investigaciones a nivel industrial incluyó la selección de una planta de extrusión supervisando el montaje y arranque de los diferentes equipos y la realización de diferentes pruebas tomando en cuenta los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y discutir sus resultados con fundamentos obtenidos de las revisiones bibliográficas, también se presentan las conclusiones de los logros obtenidos a nivel industrial.

6.1. Laboratorio

Los resultados obtenidos de las pruebas de humedad, absorción de aceite, expansión y textura, indicaron que el mejor producto se obtuvo al utilizar una velocidad rotacional de 600 rpm, 35% de humedad y utilizando harina de trigo tipo pastelera. Estas condiciones de operación se confirmaron con los resultados del modelo de superficie de respuesta en los que se observó una mayor expansión y menor absorción de aceite al disminuir la velocidad de giro del tornillo sinfín y una mejor expansión con el aumento de humedad.

6.2. Industria

Con el estudio preliminar de las condiciones óptimas de operación y la elección de la mejor harina, se llevaron los resultados como punto de partida para un desarrollo a nivel industrial. Así, la selección, supervisión del montaje y arranque de una planta industrial que procese 350 kg/h, fue el otro objetivo importante de la presente investigación aplicada. En esta parte se estudiaron los equipos comerciales de mezclado y acondicionamiento de la materia prima, el extrusor cocedor, el extrusor formador, el equipo de la etapa de secado y se seleccionaron los idóneos. Se llevó a cabo la supervisión del montaje y del arranque de los equipos, poniendo en operación una planta industrial de botanas de trigo de tercera generación la cual se ubicó en la Ciudad de México, iniciando con una capacidad de 350 kg/h y trabajando con una formulación a partir de harina de trigo pastelera tal como se determinó en el presente estudio como la mejor para elaborar este tipo de productos.

APÉNDICE A

TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS PROXIMAL

A.1 Determinación de humedad (AOAC 14.002)

Pesar de 2 a 3 g de muestra en un pesafiltro con tapa que ha sido previamente pesado después de ponerlo a peso constante 2 horas a $130\pm 3^{\circ}\text{C}$. Secar la muestra por una hora en la estufa a $130\pm 3^{\circ}\text{C}$ con la tapa del pesafiltro a un lado. Retirar de la estufa, tapar, dejar enfriar en un desecador, y pesar tan pronto como se equilibre con la temperatura ambiente. Calcular el porcentaje de humedad, informándola como pérdida por secado a 130°C .

Cálculos:

$$\% \text{HUMEDAD} = \frac{A_1 - B}{M} \times 100$$

donde : A_1 = Peso del pesafiltro más muestra

B = Peso del pesafiltro más muestra después de secar a la estufa

M = Peso de la muestra en gramos

A.2 Determinación de cenizas (AOAC 14.006)

Pesar aproximadamente de 3 a 5 g de muestra en un crisol previamente pesado después de meterlo a la mufla 2 horas a 600°C . Calcinar la muestra, carbonizando primero con mechero hasta que no se desprendan humos y meter a la mufla, cuidando que la temperatura no pase de 550°C para evitar que los cloruros se volatilicen. Se suspende el calentamiento cuando las cenizas estén blancas o grises. Enfriar en desecador y pesar.

Cálculos:

$$\% \text{CENIZAS} = \frac{(\text{Peso crisol con cenizas} - \text{Peso crisol vacío})}{\text{Peso de muestra en gramos}} \times 100$$

A.3 Determinación de proteína cruda (AOAC 7.015)

Pesar en balanza analítica de 0.5 a 1 g de muestra en papel delgado blanco, y con todo y papel, se introduce en un matraz Kjeldhal de 800 mL; se agregan 0.3 g de sulfato de cobre pentahidratado, 5 g de sulfato de potasio o sulfato de sodio, 15 mL de ácido sulfúrico concentrado y se añaden perlas de vidrio para

regular la ebullición en la destilación. Se coloca el matraz en el digestor del aparato Kjeldhal, abrir el extractor de vacío y calentar hasta la total destrucción de la materia orgánica. La solución debe quedar completamente cristalina (1 a 2 h) Enfriar. Diluir con 350 mL de agua destilada y enfriar sobre hielo.

Añadir 40 mL de una solución concentrada de hidróxido de sodio (100g en 100 mL de agua) que también ha sido enfriada sobre hielo, haciéndola resbalar lentamente por la pared del matraz, de manera que se estratifiquen las dos soluciones. No agitar porque puede haber desprendimiento prematuro de amoniaco. Adicionar 0.2 g de polvo de zinc y conectar inmediatamente el matraz a la trampa de Kjeldhal, unida al refrigerante que, a su vez, está conectado a una alargadera que se introduce en un matraz Erlenmeyer con 50 mL de ácido clorhídrico 0.1N medidos volumétricamente y adicionados de 5 gotas de indicador de rojo de metilo 0.1% en alcohol.

Una vez conectado el matraz, agitar para mezclar las dos capas y colocar inmediatamente en la parrilla ya caliente del destilador, regular la ebullición al inicio de ésta, agitando de vez en vez. Destilar hasta aproximadamente hasta un volumen de 250 ml. Suspender la destilación, retirando primero el matraz con el destilado de manera que la alargadera quede por encima y antes de apagar la parrilla, dejar destilar unos minutos, lavar por fuera con agua destilada, recogiendo en el mismo matraz.

Titular el exceso de ácido con solución valorada de hidróxido de sodio 0.1 N hasta que vire amarillo el indicador.

Corregir mediante una determinación en blanco de los reactivos usados empleando la misma cantidad de papel.

Cálculos

$\% \text{NITRÓGENO} = (\text{mL de blanco} - \text{mL problema}) \times N(\text{NaOH}) \times \text{meq Nitrógeno} \times 100 / \text{peso muestra en gramos}$

$\% \text{PROTEÍNA CRUDA} = \% \text{Nitrógeno} \times 5.7^*$

*5.7 factor para determinación de proteína en trigo

A.4 Determinación de extracto etéreo (AOAC 7.056)

Método de Soxhlet

En esta determinación se usa un extractor de Soxhlet que consta de tres partes: un extractor, un matraz y un refrigerante unidos por juntas esmeriladas. Se pesa primero el cartucho y la muestra, previamente seca, se pesa en un papel blanco (4 a 5 g). Se coloca la muestra dentro del mismo y se vuelve a pesar. Tapar la muestra con algodón y colocar el cartucho en el extractor. Por otro lado, se coloca el matraz con perlas de vidrio en la estufa a 100°C por 2 horas. Se enfría en desecador y se pesa. Se conecta el matraz al extractor y éste al refrigerante. Se agrega éter etílico por el refrigerante en cantidad de dos cargas y se calienta el matraz con parrilla hasta extraer toda la grasa de la muestra, dejando caer una gota de éter sobre un vidrio de reloj o papel filtro que al evaporarse no deje residuo de grasa.

Se saca el cartucho con la muestra desengrasada secando el extracto a 100°C por 30 min. Se enfría y se pesa.

Cálculos

$\% \text{ GRASA CRUDA} = \frac{(\text{Peso matraz con extracto} - \text{Peso matraz vacío}) \times 100}{\text{Peso muestra en gramos}}$

A.5 Determinación de fibra cruda (AOAC 7.062)

Pesar 2 g de muestra desengrasada y seca. Colocar la muestra en el vaso digestor, añadir 1 g de asbesto preparado, 200 mL de ácido sulfúrico al 1.25% (0.255 N). Calentar de inmediato, refluja durante 30 min, rotando el vaso para incorporar las partículas. Filtrar a través de papel seda especial, usando vacío y lavar con 4 porciones de 50 mL de agua caliente hasta que no dé reacción ácida al rojo de metilo. El residuo que quedó en el filtro se pasa al vaso digestor ya limpio y se repite la operación con 200 mL de hidróxido de sodio al 1.25 % (0.313 N). Después de refluja 30 min, se filtra sobre el mismo papel seda, se lava con 25 mL de ácido sulfúrico al 1.25% y con 3 porciones de 50 mL de agua caliente, comprobando que no dé reacción alcalina.

Pasar cuantitativamente el residuo a un vaso de precipitados, lavando con agua y filtrando sobre un crisol “gooch” (con una capa delgada de asbesto preparado), que posteriormente se lleva a la estufa a 130 ± 2 °C. Enfriar y pesar. Llevar a la mufla y calcinar a 600°C durante 30 min, enfriar y pesar.

Cálculos:

$$\% \text{ FIBRA CRUDA} = \{(A-B) \times 100\} / M$$

donde A = Peso del gooch después de 2 h a 130°C
 B = Peso del gooch después de calcinar 30 min a 60
 M = Peso de la muestra original en gramos (corregido con humedad y
 grasa)

A.6 Determinación de hidratos de carbono asimilables

$$\% \text{ HIDRATOS de CARBONO ASIMILABLES} = 100 - (\text{humedad} + \text{cenizas} + \text{proteína} + \text{grasa} + \text{fibra})$$

APÉNDICE B

ESPECIFICACIONES DE LAS HARINAS



Compañía Harinera de México S.A. de C.V.

ESPECIFICACIONES DE HARINA CORDON ROJO

DESCRIPCION: Harina obtenida de la extracción al 75% de una mezcla de trigos suaves y semiduros.

ENVASE: Sacos de Polipropileno de 44 Kgs., o pipas a granel de 22 tons. Su nombre comercial es "YOREDA" (Galletera)

ALMACENAJE: Se almacena en Silos de 145 tons., o sacos de polipropileno de 44 Kgs.

CARACTERISTICAS	ESTANDARES
% GLUTEN HUMEDO	30.0 ± 2.0
% CENIZA	0.560 Máximo
% HUMEDAD	14.0 ± 0.2
% PROTEINA	10 ± 0.5
TENACIDAD (U.B.)	225 ± 25
EXTENSIBILIDAD (mm)	175 ± 25
% ABSORCION	57 ± 1
ALVEOGRAMA P/G	2,8 ± 0.5
ALVEOGRAMA W ($\times 10^6$ JOULES)	140 ± 25
MEJORANTES	ENZIMAS PROTEOLITICAS
SPRED FACTOR	10 ± 1

USOS:

Elaboración de Galletas Elásticas, como complemento en la galletas de fermentación, galletas de leudado, pays.

1.8% > 150 μm



Compañía Harinera de México S.A. de C.V.

ESPECIFICACIONES DE HARINA PANIFICABLE

DESCRIPCION: Harina obtenida de la extracción al 75% de una mezcla de trigos suaves y semi-duros.

ENVASE: Sacos de polipropileno de 44 Kgs., o pipas a granel de - 22 tons. Su nombre comercial es "GRANO DE PLATA". (Pan)

ALMACENAJE: Se almacena en silos de 45 tons., 145 tons., ó sacos de - polipropileno de 44 Kgs.

CARACTERISTICAS

ESTANDARES

%	GLUTEN HUMEDO	31.0	mínimo
%	CENIZAS	0.580	máximo
%	HUMEDAD	14.0	± 0.2
%	PROTEINA	10.5	± 0.5
	TENACIDAD (U.B.)	475	± 25
	EXTENSIBILIDAD (mm)	125	mínimo
%	ABSORCION	56.0	mínimo
	ALVEOGRAMA P/G	5.0	± 0.5
	ALVEOGRAMA W ($\times 10^6$ JOULES)	250	mínimo
	MEJORANTES		PARA PANIFICACION
	VOLUMEN PAN	900	c.c. mínimo

USOS: Elaboración mecanizada de pan blanco, pan dulce, pasteles galletas, frituras de extrusión, cobertura de cacahuete - Japones, pizzas, pastas precocidas.

2.5% > 153/144

CIPRES 277 COL. SANTA MA. LA RIBERA APDO. 4-964 DELEG. CUAUHTEMOC 06400 MEXICO D.F.
TEL: 541-65-08 CONMUTADOR • 541-26-24 FAX • 547-14-74 547-09-03 VENTAS



Compañía Harinera de México S.A. de C.V.

ESPECIFICACIONES DE HARINA PASTELES

<u>DESCRIPCION:</u>	Harina obtenida de la extracción al 5% de una mezcla de trigo suave y semiduro.
<u>ENVASE:</u>	sacos de polipropileno de 44 Kgs. o pipas a granel de 22 toneladas. Su nombre comercial es "SARATOGA PASTELES".
<u>ALMACENAJE:</u>	Se almacena en silos de 145 tons., o sacos de polipropileno de 44 Kgs.

<u>CARACTERISTICAS</u>	<u>ESTANDARES</u>
± GLUTEN HUMEDO	30.0 ± 2.0
± CENIZAS	0.460 Max.
± HUMEDAD	14.0 ± 0.2
± PROTEINA	9.0 ± 0.5
TENACIDAD (U.B.)	250 ± 25
EXTENSIBILIDAD (mm)	150 ± 25
± ABSORCION	56 ± 1
ALVEOGRAMA P/G	3.5 ± 0.5
ALVEOGRAMA W (x10 ⁻⁶ JOULES)	175 ± 25
MEJORANTES	NINGUNO

ATR 7^o May. Palma
No Fax E-90-46-25

APÉNDICE C

*DATOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS
FISICOQUÍMICAS*

APENDICE C. DATOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS FISICOQUIMICAS

TABLA C.1. DATOS EXPERIMENTALES PROMEDIO DE LA HUMEDAD

MUESTRA	"PELLET"		FRITURA	
	% HUMEDAD	PESO (g)	% HUMEDAD	PESO (g)
COM1	10.0	10.08	3.6	12.40
COM2	9.8	10.34	4.3	13.37
COM3	10.2	10.12	3.6	12.92
COM4	9.6	10.26	4.2	13.44
COM5	10.6	10.21	3.9	13.34
COM6	9.9	10.06	4.6	13.51
COM7	9.8	10.27	4.2	12.83
COM8	10.2	10.08	3.1	13.04
COM9	11.0	10.48	3.8	13.69
COM10	9.4	10.64	4.4	13.23
COM11	9.6	10.91	3.2	14.12
COM12	9.9	10.00	3.1	13.60
GAL1	10.1	10.01	4.5	12.15
GAL2	9.1	10.04	3.9	12.72
GAL3	9.3	10.04	4.1	12.79
GAL4	10.0	10.01	4.1	13.11
PAN1	10.9	10.09	4.4	12.48
PAN2	9.4	10.00	3.3	13.01
PAN3	10.0	10.02	3.9	13.21
PAN4	11.6	10.51	4.6	14.90
PAS1	11.5	10.36	3.1	12.69
PAS2	9.4	10.27	4.4	13.00
PAS3	9.3	10.27	4.0	14.00
PAS4	10.9	10.01	3.8	14.40

TABLA C.2. DATOS EXPERIMENTALES PROMEDIO PARA LA EXPANSIÓN

MUESTRA	DIÁMETRO FRITURA (cm)	DIÁMETRO "PELLET" (cm)	EXPANSIÓN (cm)
COM1	1.510	0.503	0.507
COM2	1.176	0.538	0.638
COM3	1.230	0.493	0.733
COM4	1.256	0.500	0.756
COM5	1.283	0.502	0.781
COM6	1.175	0.580	0.795
COM7	1.106	0.497	0.566
COM8	1.079	0.483	0.587
COM9	1.150	0.493	0.657
COM10	1.015	0.518	0.497
COM11	1.01	0.504	0.506
COM12	1.125	0.489	0.636
GAL1	1.119	0.554	0.563
GAL2	1.175	0.593	0.582
GAL3	1.190	0.599	0.591
GAL4	1.343	0.650	0.715
PAN1	1.175	0.526	0.649
PAN2	1.308	0.580	0.719
PAN3	1.390	0.638	0.752
PAN4	1.410	0.620	0.790
PAS1	1.410	0.601	0.809
PAS2	1.475	0.630	0.825
PAS3	1.469	0.637	0.832
PAS4	1.505	0.640	0.865

TABLA C.3 DATOS ESTADÍSTICOS PROMEDIO DE LA ABSORCIÓN DE ACEITE

MUESTRA	AGUA PERDIDA (AP)*	AP x PESO "PELLET"	MATERIA SÓLIDA**	ABSORCIÓN DE ACEITE***
COM1	0.064	0.640	9.054	3.98
COM2	0.075	0.750	9.230	4.63
COM3	0.086	0.860	9.080	4.58
COM4	0.074	0.740	9.276	4.71
COM5	0.067	0.711	9.127	4.92
COM6	0.053	0.530	9.064	4.98
COM7	0.050	0.575	9.265	4.32
COM8	0.051	0.594	9.591	4.79
COM9	0.072	0.754	9.127	5.11
COM10	0.050	0.552	9.659	4.23
COM11	0.064	0.608	9.862	4.96
COM12	0.068	0.680	9.010	5.27
GAL1	0.056	0.561	8.99	3.72
GAL2	0.070	0.592	9.05	4.26
GAL3	0.037	0.572	9.05	4.31
GAL4	0.019	0.591	8.99	4.73
PAN1	0.063	0.658	9.30	3.53
PAN2	0.047	0.470	9.80	4.48
PAN3	0.035	0.551	9.07	4.88
PAN4	0.070	0.733	10.18	5.25
PAS1	0.069	0.662	9.16	4.19
PAS2	0.039	0.513	9.30	4.18
PAS3	0.073	0.543	9.33	5.20
PAS4	0.057	0.531	9.08	5.83

*AGUA PERDIDA (AP) = (humedad "pellet" - humedad fritura) / 100

**MATERIA SÓLIDA = peso "pellet" - (peso "pellet" x humedad "pellet") / 100

***ABSORCIÓN ACEITE = peso fritura x AP - materia sólida

TABLA C.4: DATOS EXPERIMENTALES PROMEDIO PARA LA OBTENCIÓN DEL
COEFICIENTE DE FRACTURA

MUESTRA	DISTANCIA (cm)	t RELAJACIÓN (seg E2)	MASA (Kg x 10E5)	DIÁMETRO (cm)	COEF. FRACTURA (Cf x 10E9)*
COM1	5.1	22.67	8.796	1.010	2.892
COM2	4.6	20.44	9.402	1.176	1.889
COM3	4.6	21.18	8.542	1.230	2.134
COM4	4.9	21.07	8.785	1.256	2.011
COM5	4.7	20.89	10.142	1.283	1.676
COM6	4.6	20.44	12.186	1.375	1.246
COM7	5.0	20.44	7.165	1.106	2.636
COM8	4.7	20.89	6.515	1.070	3.130
COM9	4.6	20.44	7.666	1.150	2.371
COM10	5.1	22.67	6.940	1.015	3.648
COM11	4.9	21.78	7.176	1.010	3.272
COM12	4.6	20.67	7.674	1.125	2.472
GAL1	4.7	23.34	6.962	1.119	4.285
GAL2	5.1	23.69	6.634	1.175	3.399
GAL3	5.3	21.56	8.724	1.190	2.239
GAL4	5.2	23.33	8.376	1.345	2.416
PAN1	4.9	21.78	7.021	1.175	2.875
PAN2	6.1	27.25	10.641	1.300	2.684
PAN3	5.3	23.55	8.994	1.390	2.212
PAN4	5.2	23.11	10.194	1.410	1.858
PAS1	5.1	22.68	7.852	1.410	2.323
PAS2	5.3	23.56	10.672	1.475	1.763
PAS3	5.4	24.00	12.383	1.469	1.583
PAS4	5.0	22.22	10.578	1.505	1.551

$$*Cf = F \times tr E2 / m \times d$$

donde: F = fuerza aplicada en el texturómetro (5 N)

tr E2 = tiempo de relajación al cuadrado (seg)

m = masa promedio de la fritura (Kg)

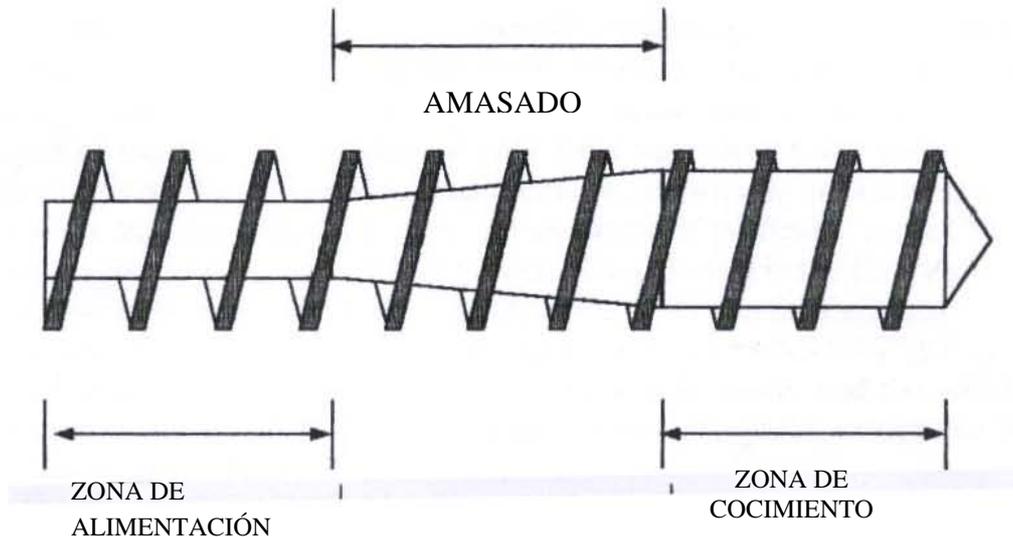
d = diámetro promedio de la fritura (cm)

APÉNDICE D
EXTRUSIÓN, FUNDAMENTOS

La Figura D.1 (2.3a) muestra en forma esquemática las zonas que teóricamente tiene un extrusor: la de alimentación, la de transición o amasado y la de cocimiento o *extrusión* propiamente dicha.

Zona de alimentación. La función de esta zona es comprimir el material y transportarlo a la zona de cocción. Las ecuaciones para la zona de alimentación de los extrusores de polímeros se basan en la suposición de que el material alimentado forma un “listón” sólido que se desliza a lo largo del canal en forma rígida. Los materiales alimenticios normalmente no forman un “listón” sólido, pero su comportamiento es como una combinación entre un “listón” sólido y un flujo fluido en la sección de alimentación. El análisis del modelo idealizado desprecia esta zona. La presión que existe es mínima y puede inyectarse agua para ayudar a desarrollar la textura deseada ⁽⁵⁷⁾. Harper y Harmann ⁽³⁰⁾, en 1973, consideran una zona de transición (**Zona de amasado**) entre la zona de alimentación y la de cocción que involucra flujo en dos fases. Observaron que cuando se alimentan al extrusor materiales alimenticios sólidos, hay un comportamiento similar a la fusión de los plásticos dentro del extrusor. La fusión ocurre en la superficie interior del barril o contenedor del tornillo y en una delgada película entre el “listón” sólido y el que fluye a través de los álabes del tornillo ⁽⁴⁴⁾.

Figura D.1 (2.3a). Zonas en que puede conceptualizarse el interior de un extrusor ⁽²⁵⁾



Zona de cocción (“Metering Section” en inglés)

Esta sección es quizá la más importante del extrusor. Su función es recibir el material comprimido, homogeneizarlo y hacerlo pasar a través de la boquilla a presión constante. La homogeneización está acompañada por un mezclado intensivo de los flujos longitudinal y transversal a través del canal.

El tratamiento matemático de esta zona supone que el material actúa como un verdadero fluido, exhibe deformaciones al esfuerzo y no se desliza en las superficies del tornillo y el barril. Esta sección del extrusor se comporta como una bomba centrífuga, con la capacidad de bombeo inversamente relacionada a la presión de bombeo. Las condiciones de temperatura, humedad y presión en esta zona dan lugar a la gelatinización del almidón. La compresión es la máxima y el material se transforma en una masa plastificada de donde se obtiene el producto deseado ^(36, 44). El mecanismo de este efecto de presión puede describirse separando el flujo neto del extrusor en dos componentes ideales denominados flujo de arrastre y flujo de presión:

$$\boxed{Q_{neto} = Q_a - Q_p} \quad (D-1 2-2)$$

donde

Q_{neto} = flujo neto

Q_a = flujo de arrastre

Q_p = flujo de presión

Flujo de arrastre

El componente longitudinal del flujo es denominado flujo de arrastre. La velocidad del barril con respecto al tornillo (V_b) puede dividirse en dos componentes. El componente en la dirección longitudinal al canal (V_d) es el responsable del flujo por arrastre. El componente transversal al canal (V_c) no afecta directamente el flujo, pero contribuye al mezclado y corte.

La velocidad de distribución del material en la dirección longitudinal al canal varía de cero, en la superficie del tornillo hasta V_d en la superficie del barril. La velocidad de flujo de arrastre es proporcional a la velocidad promedio en el canal y se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_a = \rho N D W H / 2$$

(D-2 2-3)

donde

- N = velocidad del tornillo (rpm)
- D = diámetro del tornillo (mm)
- W = ancho del canal (mm)
- H = profundidad del canal (mm)
- ρ = densidad (g/ mm³)

El flujo de arrastre depende sólo de la velocidad y geometría del tornillo y es independiente de la presión y viscosidad. Físicamente, esta cantidad es el máximo rendimiento teórico de salida para el tornillo, esto es, es el rendimiento o salida máxima de producto esperado si no existiera boquilla o “dado” de descarga al final del tornillo. Sin embargo, el enfriamiento del tornillo tiende generalmente a retardar el flujo de arrastre y reducir la salida del material. El calentamiento del tornillo incrementa el flujo de arrastre y cuando éste es mayor que el flujo de presión se incrementa la salida del material.

Flujo por presión

El componente del flujo debido a presión puede visualizarse imaginando un tornillo estático donde fluye el material en dirección inversa al extremo de descarga a alta presión. Como en cualquier situación de flujo, el flujo es proporcional al gradiente de presión a lo largo del tornillo e inversamente proporcional a la resistencia (viscosidad y la geometría del tornillo). Este flujo representa el flujo opuesto al flujo de arrastre y puede representarse por la siguiente ecuación:

$$Q_p = V_r H W$$

(D-3 2-4)

donde

- V_r = velocidad de recirculación promedio
- W = ancho canal (mm)
- H = profundidad canal (mm)

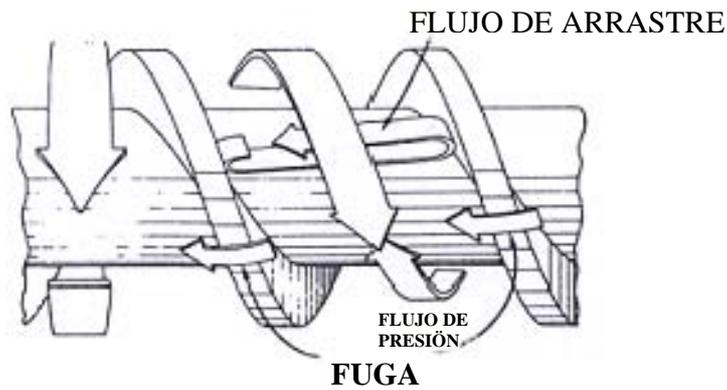
Flujo neto

El flujo neto puede esquematizarse por superposición de las distribuciones individuales de los flujos de arrastre y de presión. Un flujo por presión grande

puede crear un área de velocidad negativa cerca del tornillo. En realidad este flujo, de dirección inversa crea corrientes de conglomerados (eddy currents) que contribuyen al mezclado y cizallamiento en las Figs.D.2 y D.3 (2.3b,c):

$$Q_{neto} = Q_a - Q_p$$

(D-12-2)



COMPONENTES DE FLUJO

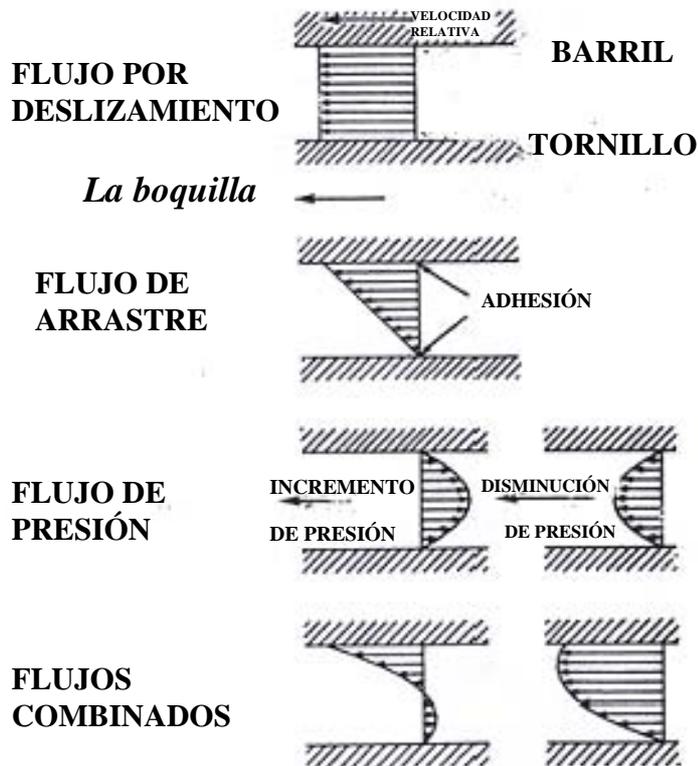
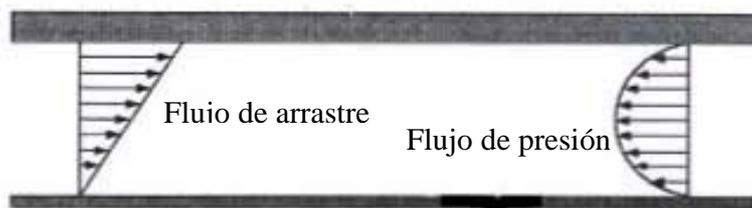
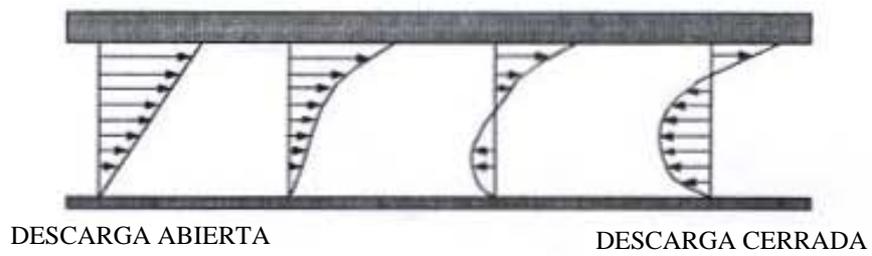


Figura D-2 (2.3b). Flujos de material en un extrusor ⁽⁵⁴⁾



POSIBLES COMBINACIONES DE FLUJO



Perfiles de Velocidad Posibles dentro del Canal del Tornillo

Figura D-3 (2.3c). Perfiles de velocidad posibles dentro del canal del tornillo ⁽⁵⁴⁾

La presión en el extrusor ideal alcanza un máximo en el extremo del tornillo, y cuando el material pasa a través de la boquilla hay una caída de presión hasta la presión atmosférica. El flujo a través de la boquilla es función de la viscosidad, geometría de la boquilla (resistencia) y caída o gradiente de presión como lo ilustra la siguiente ecuación:

$$\boxed{Q_{boquilla} = k \Delta P / \mu}$$

(D-4 2-5)

donde

$Q_{boquilla}$ = flujo de material a través de la boquilla
 ΔP = gradiente presión
 μ = viscosidad de la alimentación
 k = constante de la boquilla (geometría)

La boquilla tiene como función principal dar la forma y tamaño deseados al producto extrudido.

Características de operación

El producto sometido en las primeras etapas o zonas del extrusor, sufre prácticamente un preacondicionamiento y mezclado que poco contribuyen a la cocción del material. Básicamente, la cocción tiene lugar en la parte inicial del extrusor, donde la energía de fricción se convierte en calor. El aumento de calor en el material que pasa a través del extrusor es proporcional a la potencia empleada. El incremento de la temperatura en el extrusor puede expresarse como sigue:

$$\boxed{T = \frac{kVAk}{M_{sol} C_{psol} + M_{liq} C_{pliq}}$$

(D-5 2-6)

donde

kVA = potencia requerida por el extrusor
K = constante para convertir kVA a energía calorífica
 M_{sol} = flujo de material seco
 C_{psol} = calor específico de material seco
 M_{liq} = flujo de humedad (agua)
 C_{pliq} = calor específico del agua

Se observa que la temperatura alcanzada durante la *extrusión* depende de la potencia requerida, el flujo del material sólido y el contenido de humedad ⁽⁴⁹⁾ del material que entra al extrusor. A flujo constante, la temperatura alcanzada será proporcional a la potencia gastada.

Se ha encontrado en la práctica que, para un área de boquilla dada, la potencia requerida tiene una variación casi lineal con el flujo alrededor del punto de control, o sea, que una vez seleccionada una boquilla, las propiedades del material extrudido específico están también fijas e, independientemente del flujo, la relación potencia requerida/flujo, permanece constante.

La selección del área de la boquilla tiene que contemplar un balance entre la ventaja económica de un alto flujo obtenido con un área de salida grande y un grado menor de cocción.

El contenido de grasa del material que se alimenta determina también el flujo del extrusor, ya que a altos contenidos de grasa se extruden altos flujos de material; esto puede explicarse por un aumento de lubricación dentro del extrusor, dando por resultado menores temperaturas de *extrusión* ^(7,64).

Este mismo efecto lubricante se puede conseguir por un incremento en la humedad del material de alimentación que, aunque económicamente parece atractivo, el grado de cocción puede verse alterado y esto es una desventaja.

Como efecto inverso, el flujo se minimiza por reducción de área de boquilla. El alto contenido de grasa o humedad en los materiales de entrada puede hacer más libre el flujo, pero es necesario evaluar los efectos sobre textura y cocción de los productos.

La presión generada en la dirección del eje del tornillo no es grande hasta que el material es forzado contra la placa del fondo, en donde está localizada la boquilla. Por esto se supone que la mayor parte de la cocción ocurre en la zona comprendida entre el extremo del tornillo y la placa del fondo y que el tiempo de cocción a alta temperatura es igual al tiempo de residencia en esta zona (según Sprout Waldron es de 2 a 3 segundos aproximadamente), por lo que la rapidez de transferencia de calor puede ser un factor limitante.

Cuando el material extrudido abandona la boquilla, se expande violentamente con la evaporación instantánea (“flash”) de las fracciones volátiles y la cantidad perdida de éstas está controlada por la temperatura de *extrusión*. La evaporación provoca un rápido enfriamiento del producto, que conduce a la desnaturalización de proteínas.

Posteriormente a la expansión del producto, sigue una contracción del material a su diámetro de equilibrio. La expansión inicial no parece estar relacionada a su diámetro de equilibrio sino que parece ser causada por la transición de alta presión dentro del extrusor a las condiciones ambientales.

El diámetro de equilibrio, por lo general, es considerablemente menor que el obtenido inicialmente y varía con la composición del producto y la evaporación de las fracciones volátiles.

Un balance de calor del producto durante la expansión podría expresarse como:

$$\boxed{M_{fv} \lambda = M_{sol} C_{p\ sol} + M_{liq} C_{p\ liq}} \quad (D-6\ 2-7)$$

donde:

- M_{fv} = masa de la fracción vaporizada
- λ = calor latente de vaporización
- M_{sol} = flujo de material seco
- $C_{p\ sol}$ = calor específico de material seco
- M_{liq} = flujo humedad (agua)
- $C_{p\ liq}$ = calor específico agua

La caída de temperatura del producto extrudido, $\Delta T_{evap\ inst}$, debida a la evaporación instantánea es:

$$\boxed{\Delta T_{evap\ inst.} = M_v \lambda / (M_{sol} C_{p\ sol} + M_{liq} C_{p\ liq})} \quad (D-7\ 2-8)$$

donde:

- M_v = masa evaporada instantáneamente
- λ = calor latente de vaporización
- M_{sol} = flujo de material seco
- $C_{p\ sol}$ = calor específico de material seco
- M_{liq} = flujo humedad (agua)
- $C_{p\ liq}$ = calor específico agua

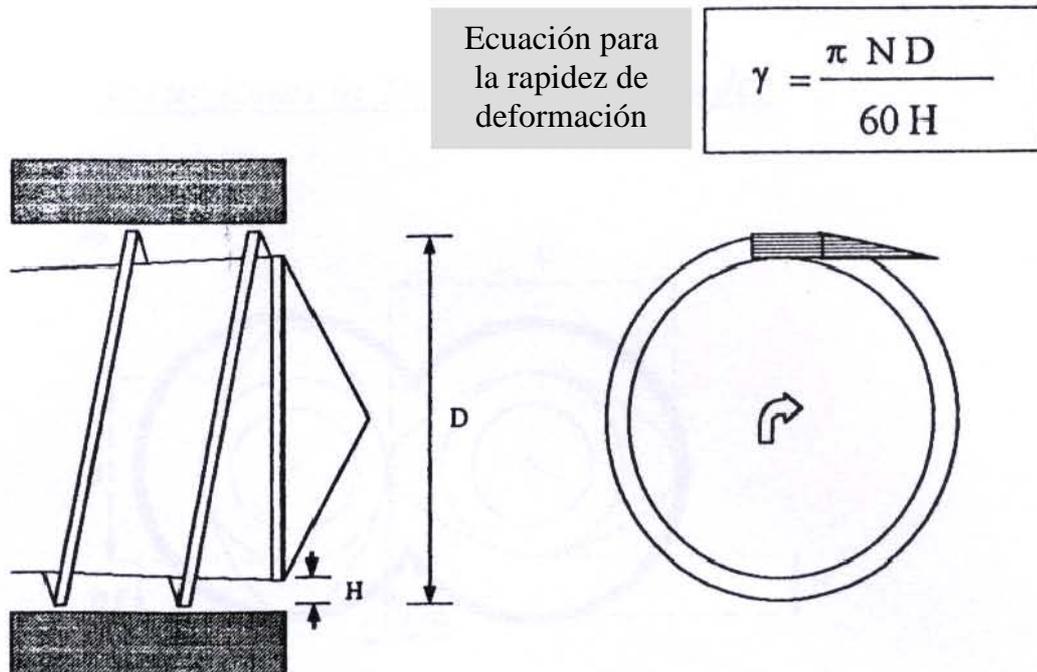
Relación de diferentes variables de extrusión^(27,28, 29,31)

Los esfuerzos generados en un extrusor es una consideración muy importante a la hora de elegir un extrusor. Algunos materiales necesitan ser tratados gentilmente por lo que requieren de niveles bajos de fricción. Otros requieren altos niveles de trabajo mecánico durante todo el tiempo que dure el proceso de *extrusión* o sólo por un corto tiempo. Dependiendo de los requerimientos del producto final, se deben considerar los mínimos, máximos o un promedio de esfuerzos cortantes, para alcanzar la meta deseada. El máximo esfuerzo cortante en un extrusor normalmente se alcanza en el flujo a través de algún anillo o zona de restricción. En extrusores simples generalmente hay una zona y en los de doble tornillo pueden existir más de una zona. En ambos casos, la cantidad de material que fluye a través de estas zonas es muy pequeña y los efectos del trabajo mecánico en la masa de producto es de considerable importancia en la transformación de las propiedades de la masa.

Para comparar los esfuerzos en los diferentes tipos de extrusores, la acción del desplazamiento positivo debe tomarse en consideración. En los extrusores de doble tornillo a contra rotación, prácticamente no hay flujo de retroceso o retropresión en el canal, lo que significa la alta eficiencia en desplazamiento positivo. En el caso de extrusores de un tornillo, la acción de transporte positiva con su flujo de presión o retropresión es menor.

En general la profundidad del canal es determinante en la distribución de esfuerzos cortantes. Al disminuir la profundidad aumenta la fricción y al aumentar la profundidad se tiene un menor trabajo mecánico sobre la masa. (Fig. D.4). El efecto de la velocidad del tornillo (rpm) tiene un efecto significativo sobre el esfuerzo o trabajo mecánico generado sobre el producto y va ligado a los efectos de temperatura tal como se muestra en la Fig. D.5. Así mismo, hay una relación muy interesante de las variables que se manejan en la *extrusión* y que se muestran en las Figuras D.6 y D.7. El control de la temperatura y el tiempo de residencia en el extrusor tienen mucha importancia en el desarrollo de los productos. La presión del vapor de agua está relacionada con la temperatura (y ésta con la velocidad rotacional rpm) y proporciona la mayor parte de la fuerza necesaria para la expansión cuando el producto sale a presión ambiente. Consecuentemente, la densidad del producto está relacionada con la temperatura de *extrusión*. Existen diferentes formas de control de temperatura, esfuerzo cortante y velocidad de deformación durante el proceso de *extrusión* en un extrusor de tornillo simple. Se logra, por ejemplo, cambiando el contenido de humedad y temperatura de los materiales de alimentación. Materiales de baja humedad requieren de mayor energía mecánica para fluir. Una mayor energía mecánica da como resultado mayores temperaturas (porque hay más fricción) y causa mayor daño al material.

TORNILLO DE EXTRUSIÓN DE ALTA FRICCIÓN



TORNILLO DE EXTRUSIÓN DE BAJA

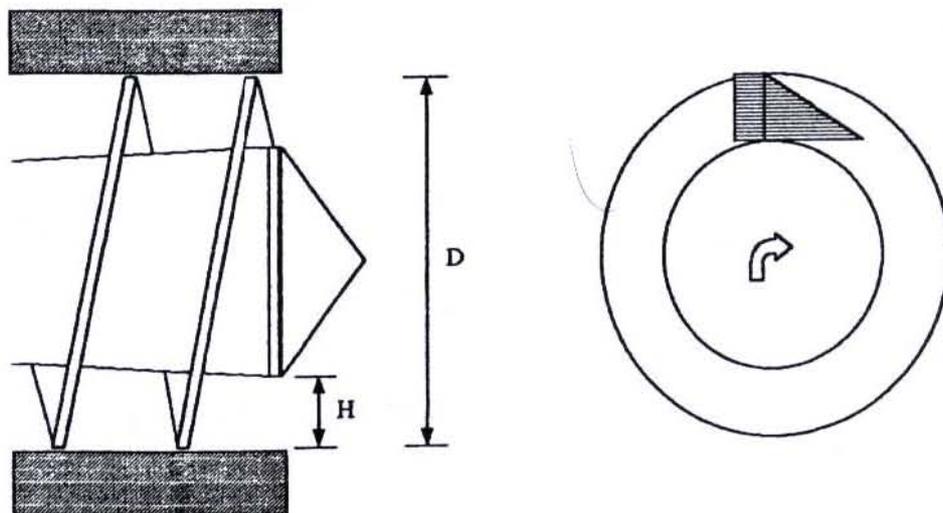


Figura D.4. Diagramas esquemáticos de extrusores con tornillos de alta y baja fricción ⁽⁵⁴⁾

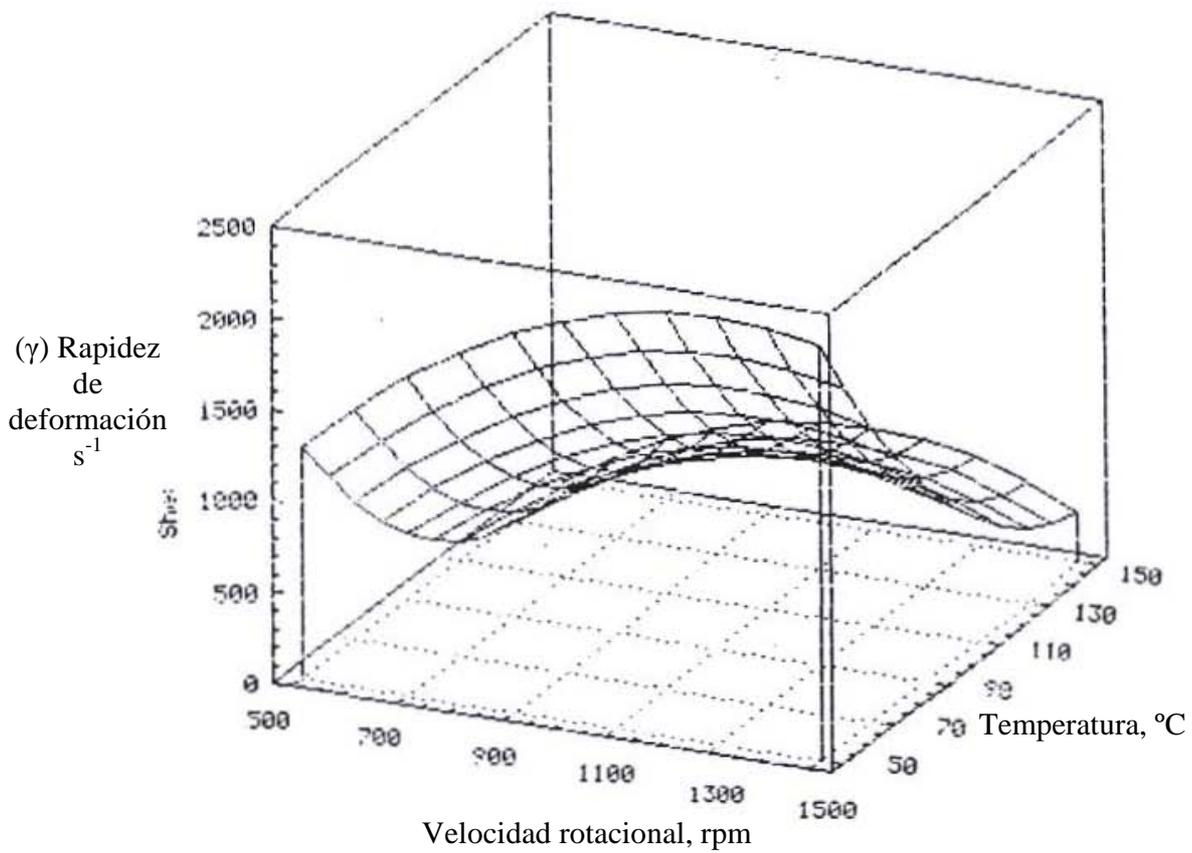


Figura D.5. Distribución de esfuerzos cortantes en función de la velocidad rotacional del tornillo y la temperatura ⁽⁵⁴⁾

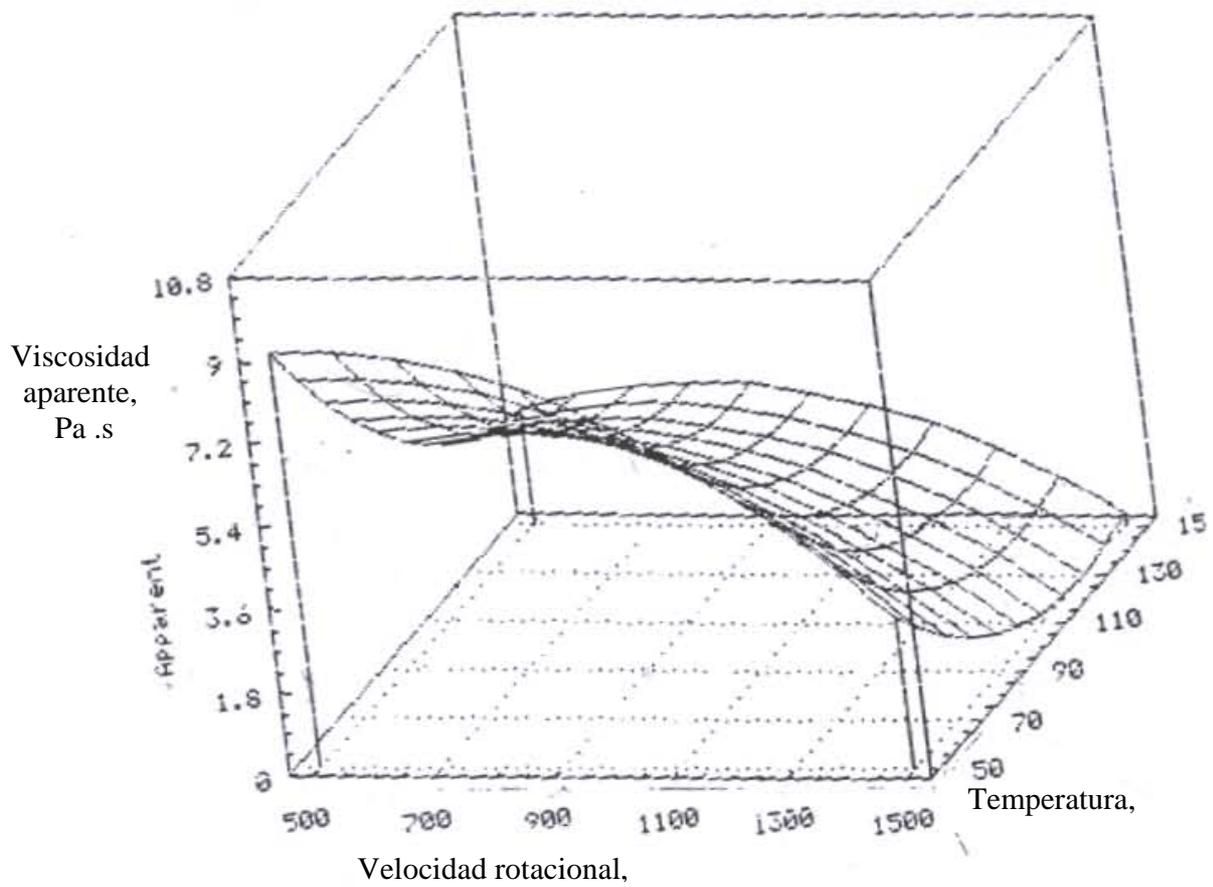


Figura D.6. Viscosidad aparente en función de la velocidad rotacional del tornillo y la temperatura ⁽⁵⁴⁾

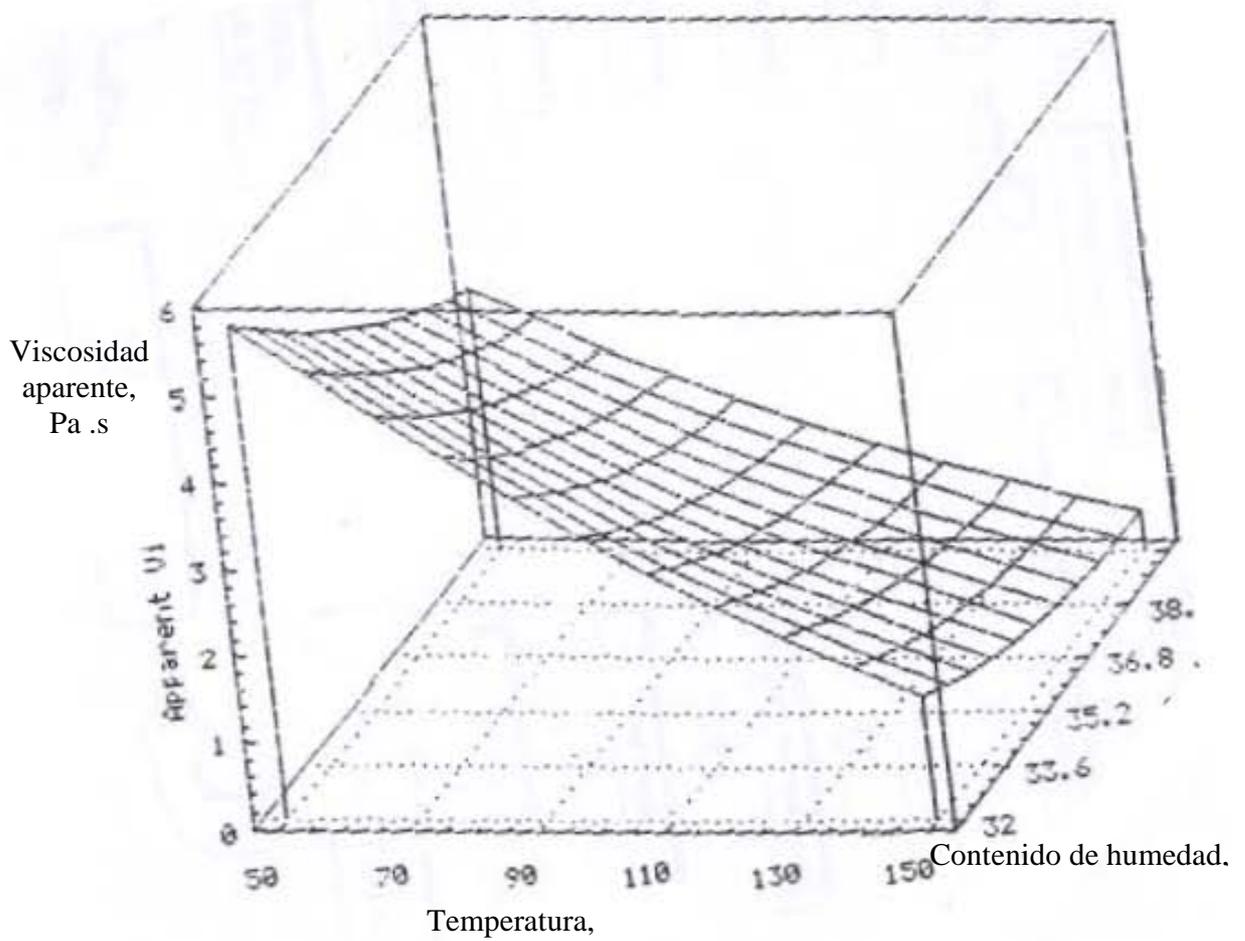


Figura D.7. Viscosidad aparente en función de la temperatura y el contenido de humedad del material a extrudir⁽⁵⁴⁾

APÉNDICE E
ECUACIONES DE SECADO

Periodo de velocidad constante

Ecuación de velocidad de transferencia de masa

$$\boxed{(dW / dt)_c = - K_g A (p_s - p_a)}$$

(E-1)

donde:

$(dW / dt)_c$ = velocidad de secado

K_g = coeficiente de transferencia de masa

A = área de secado

p_s = presión de vapor en la superficie

p_a = presión parcial de vapor de agua en el aire

o bien:

$$\boxed{(dW / dt)_c = - K_g A (H_s - H_a)}$$

(E-2)

donde:

$(dW / dt)_c$ = velocidad de secado

K_g = coeficiente de transferencia de masa

A = superficie o área de secado

H_s = humedad en la superficie

H_a = humedad del aire

Ecuación de Velocidad de Transferencia de Calor

$$\boxed{(dQ / dt)_c = - h_c A (T_a - T_s)}$$

(E-3)

donde :

$(dQ / dt)_c$ = velocidad de transferencia de calor

h_c = coeficiente de transferencia de calor por convección

A = área o superficie de secado

T_a = Temperatura de bulbo seco del aire

T_s = Temperatura de la superficie de secado (bulbo húmedo)

Como existe un estado de equilibrio entre la velocidad de transferencia de calor hacia el cuerpo y la velocidad de transferencia de masa de él hacia el exterior, las dos velocidades se relacionan como se indica a continuación:

$$(dW / dt)_c L = - (dQ / dt)_c$$

(E-4)

donde:

L = calor latente de evaporación a T_s

Combinando las ecuaciones (E-3) y (E-4) se tiene:

$$(dW / dt)_c = -h_c A (T_a - T_s) / L$$

(E-5)

Para productos que evaporan solamente de su superficie superior, si se supone que no habrá contracción durante el secado, la ecuación (E-5) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$(dW / dt)_c = -h_c (T_a - T_s) / L d b$$

(E-6)

donde:

d = densidad del producto seco

b = profundidad de la cama

El tiempo de secado en el periodo de velocidad constante puede obtenerse si se integra la ecuación anterior :

$$t_c = (W_o - W_c) L d b / h_c (T_a - T_s)$$

(E-7)

donde :

t_c = tiempo de secado de velocidad constante

W_o = contenido de humedad inicial del producto

W_c = contenido de humedad final al término del periodo de velocidad constante.

De acuerdo con Perry, el uso de coeficientes de transferencia de calor es más confiable que el de los coeficientes de transferencia de masa y sugiere que para muchos casos los coeficientes de transferencia de calor pueden expresarse como:

$$\boxed{h_c = a G^n / D_c^m} \quad (E-8)$$

donde:

h_c = coeficiente de transferencia de calor

G = velocidad de la masa de aire

D_c = dimensión característica del sistema

a, n, m = constantes empíricas

Para velocidad constante de secado de la superficie, cuando los efectos de radiación y conducción no son tan importantes, h_c de la ecuación anterior puede ser usada en la ecuación (E-5), por lo que

$$\boxed{(dW/dt)_c = a G^n A (T_a - T_s) L D_c^m} \quad (E-9)$$

Para estimar la velocidad de secado de la ecuación (E-9) se requiere de los valores de las constantes empíricas para la geometría y condiciones particulares de secado que se tengan. Para flujo paralelo en placas planas, el exponente n se ha reportado en un rango de 0.35 a 0.8 (Chu, Lane y Conklin, Ind. Eng. Chem., 45, 1586 (1953)).

Período de velocidad decreciente

Este período que se inicia al terminar el periodo de velocidad constante, consta de dos zonas: 1) la zona de superficie de secado insaturada y 2) la zona donde el movimiento de la humedad interna controla el proceso.

Cuando existe un control de la difusión líquida en el período de velocidad decreciente, la ecuación de conducción de energía que se usa para describir la velocidad de movimiento de la humedad es.

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\Pi^2} \left[e^{-D_1 t (\Pi/2d)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_1 t (\Pi/2d)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_1 t (\Pi/2d)^2} + \dots \right]$$

(E-10)
donde:

- W = contenido promedio de humedad (base seca) a cualquier tiempo t
- W_e = contenido de humedad en equilibrio
- W_c = contenido crítico de humedad
- t = tiempo desde el comienzo del período decreciente
- D_1 = difusividad líquida
- d = mitad del espesor de la capa de sólido a través de la cual ocurre la difusión. Si la difusión ocurre por una sola cara, d será el total del espesor de la capa de sólido.

La ecuación (E-10) asume D_1 constante, aunque realmente D_1 rara vez lo es, ya que varía con el contenido de humedad y temperatura.

Para tiempos de secado largos, la ecuación (E-10) se simplifica a una forma limitada de la ecuación de difusión:

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_1 t \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2}$$

(E-11)

La ecuación (E-11) se puede diferenciar para dar la velocidad de secado como:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{-\pi^2 D_1}{4d^2} (W - W_e)$$

(E-12)

donde:

dW/dt = velocidad de secado

D_1 = difusividad líquida

W = contenido promedio de humedad (base seca) a tiempo t

W_e = contenido de humedad en equilibrio

d = espesor de la capa sólida

La ecuación (E-12) establece, que cuando la difusión interna controla por periodos muy largos, la velocidad de secado es directamente proporcional al contenido de agua libre ($W - W_e$) y la difusividad líquida D_1 y los tiempos de secado varían con el cuadrado del espesor de los materiales.

La ecuación para el período de velocidad decreciente puede ser expresada con buena precisión sobre el intervalo requerido de contenidos de humedad por una ecuación parecida a la ecuación (E-12) cuando la humedad se mueve de una región de alta a baja concentración por acción capilar más que por difusión:

$$\boxed{(dW / dt)_f = K_1 (W - W_e)} \quad (E-13)$$

donde K_1 es una función de la velocidad constante como sigue:

$$\boxed{K_1 = \frac{(dW / dt)_c}{(W_c - W_e)}} \quad (E-14)$$

donde:

$(dW / dt)_c$ = velocidad de secado constante

W_c = contenido crítico de humedad

W_e = contenido de humedad en equilibrio

Substituyendo la expresión $(dW / dt)_c$ como se dio en la ecuación (E-6) dentro de la ecuación (E-14) y luego substituyendo K_1 en la ecuación (E-13), la ecuación de velocidad decreciente se transforma en :

$$\boxed{(dW / dt)_f = \frac{-h_c(T_a - T_s)(W - W_e)}{Ldb(W_c - W_e)}} \quad (E-15)$$

Cuando la temperatura de la superficie en el periodo de velocidad constante es la temperatura de bulbo húmedo, T_w puede sustituir a T_s .

El tiempo de secado en cada caso del periodo de velocidad decreciente puede obtenerse por integración de las ecuaciones (E-12) y (E-15) y dar lo siguiente:

1.- Para materiales en los que el movimiento de humedad está controlado por difusión:

$$t_f = \frac{4d^2}{D_t \pi^2} \ln \frac{W_c - W_e}{W - W_e}$$

(E-16)

2.- Para materiales en los que el movimiento de humedad está controlado por capilaridad:

$$t_f = \frac{Ldb(W_c - W_e)}{h_c(T_a - T_s)} \ln \frac{W_c - W_e}{W - W_e}$$

(E-17)

Bibliografía

1. **AGUILERA, J.M., KOSIKOWSKI, F.V., HOOD, L.F.** 1976. *Ultrastructural changes occurring during thermoplastic extrusion of soybean grits*, J. Food Sci., 41, 1209-1210.
2. **AGUILERA, J.M., KOSIKOWSKI, F.V., HOOD, L.F.** 1976. *Soybean Extruded Product: A Response Surface Analysis*, J. Food Sci., 41, 647-651.
3. **ANÓN.** 1977. *Low-cost extrusion cooking*, Food Eng. Int., 2(8), 42-44.
4. **AOAC.** 1984. *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C., EEUUA, 126-129, 132-133, 211.
5. **ARTZ, W. E., WARREN, C., VILLOTA, R.** 1990. *Twin screw extrusion modification of a corn fiber and corn starch extruded blend*, J. Food Sci., 55 (3), 746-751.
6. **BADUÍ, S.** 1981. *Química de los alimentos*, Ed. Alhambra, 3ª. Edición, México D.F., México, 97-101.
7. **BHATTACHARYA, M., HANNA, M.A.** 1988. *Effect of Lipids on the Properties of Extruded Products*, J. Food Sci., 53(4), 1230-1231.
8. **BRENNAN, J.G., BUTTERS, J.R., COWWELL, N.D., LILLEY, A.E.V.** 1976. *Dehydration-Food Engineering Operations*, Applied Science, Londres, Inglaterra, 371-415.
9. **BURGESS, L.D., STANLEY, D.W.** 1976. *A possible mechanism for thermal texturization of soybean protein*, Can. Inst. Food Sci. Technol. J., 9(4), 231-232.
10. **BYRNE, M.** 1993. *The Boom in Snack Foods*, Food Eng. Int'l., 7(9), 56-57.
11. **CARVAJAL, M. J.** 1981. *El alveógrafo ¿Qué tan exacto es?*. PAN Continental, México D.F., México, 24-32.

12. **CARVAJAL, M. J., CASTILLA-CHACÓN, F.** 1984. *La harina de trigo en México; su calidad*, PAN Continental, México D.F., México, No. 256, 25-29.
13. **CLARK, J. P.** Marzo 1986. *Texturization processes in the cereal foods industry*, Food Technology, 91-92.
14. **COLONNA, P., DOUBLIER, J.P., MELCION, F., de MONREDON, MERCIER, C.** 1984. *Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. Physical and macromolecular modifications*, Cereal Chem., 61(6), 538-543.
15. **CONWAY, H.F., LANCASTER, E.B., BOOKWALTER, G.N.** 1968. *How extrusion cooking varies product properties*, Food Eng., 40(11), 102-103.
16. **CURIEL, S.R. y MORALES, L.J.** 1986. *Utilización de mezclas girasol-trigo para la elaboración de sopas tipo pasta*. Rev. Tecnol. Aliment. Mex. Vol 21 No 2, 13-17.
17. **DAVIDSON, V.J., PATON, D., DIOSADY, L.L., LAROCQUE G.** 1984. *Degradation of wheat starch in a single screw extruder: Characteristics of extruded starch polymers*, J. Food Sci., 49, 453-458.
18. **DAVIDSON, V.J., PATON, D., DIOSADY, L.L., SPRATT, W.A.** 1983. *Residence time distributions for wheat starch in a single screw extruder*, J. Food Sci., 48, 1157-1161.
19. **deMUELENAERE, H. J. H., BUZZARD, J. L.** 1969. *Cooker extruders in service of world feeding*, Food Technol. (Chicago), 23, 345-347.
20. **DURÁN, C.** 1988. *Una nueva tecnología para la extrusión alcalina de maíz y sorgo*, Proyecto Multinacional de Tecnología de Alimentos-OEA-UNAM, Vol. 2, México D.F., México, 8-12.
21. **FARRELL, D.** 1971. *Extrusion equipment- types, functions and applications, Symposium on Extrusion: Process and Product Development, American Association Of Cereal Chemists, St. Paul, Minn. EEUUA.*
22. **FELLOWS, P.** 1994. *Tecnología del procesado de alimentos: Principios y prácticas*, Ed. Acribia, Zaragoza, España, 135-152, 225-247.

23. **FENNEMA, O.R.** 1993. *Química de los alimentos*, Ed. Acribia, Zaragoza, España, 237-240.
24. **GONZÁLEZ, S. J.** 1991. *SNACKS, Elaboración a base de cereales expandidos*, Industria Alimenticia, Colombia, 26-28.
25. **GUERRA, R.** 1978. *Extrusión, una nueva tecnología aplicada al procesamiento de maíz normal y opaco*, Facultad de Química, UNAM, México, D.F., México, 17-35.
26. **HARPER, J.M.** 1988. *Effects of Extrusion Processing on Nutrients*, Van Nostrand Company, Nueva York EEUUA, Cap. 14, 3a. Ed., 365-391.
27. **HARPER, J.M.** 1979. *Food Extrusion*, CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 11(2), 155-175.
28. **HARPER, J. M.** 1984. *Extrusion of foods, Vol II*, CRC Press, Inc., Florida, EEUUA, 115-122, 385-450.
29. **HARPER, J.M.** 1988. *Extrusion Processing of Food*, Food Technology, 67-72.
30. **HARPER, J.M., HARMANN, D.V.** 1973. *Effect of extruder geometry on torque and flow*, Trans. ASAE, 16 (6), 1175-1177.
31. **HAUCK, B.W.** 1981. *Control of Process Variables in Extrusion Cooking*, Cereal Food World, 26(4), 170-173.
32. **HAWTHORN, J.** 1983. *Fundamentos de Ciencia de los Alimentos*, Ed. Acribia, Barcelona, España, 38-59.
33. **HOSENEY, R. C.** 1991. *Principios de ciencia y tecnología de los cereales*, Ed. Acribia, Zaragoza, España, 3-59, 90-105.
34. **JAO, Y.C., CHEN, A.H., GOLDSTEIN, W.E.** 1985. *Evaluation of corn protein concentrate: Extrusion Study*, J. Food Sci., 50, 1257-1258.
35. **KENT, N. L.** 1987. *Tecnología de los cereales*, Ed. Acribia, Zaragoza, España, 1-16, 64-86, 107-121, 133-143.

36. **KURT, S.** 1984. *La extrusión HTST como moderna tecnología para el procesamiento de cereales*, *Industria Alimentaria*, 17,15-21.
37. **LANE, R. P.** 1993. *Formulation variables affecting the flavor of extruded snacks and crackers*, *Cereal Foods World*, 28(3), 181-183.
38. **LICHTINGER, W. I.** 1975. *Extrusión en alimentos, Tesis profesional*, Facultad de Química, UNAM, México D.F., México, 7-24.
39. **LORENZ, K., WELSH, J., NORMANN, R., BEETNER, G., FREY, A.** 1974. *Extrusion processing of triticale*, *J.Food Sci.*, 39, 572-575.
40. **MANLEY, D., J. R.** 1983. *Tecnología de la industria galletera*, Ed. Acribia, Zaragoza, España, 3-38.
41. **MARTÍNEZ, E.V.** 1985. *Análisis sensorial, una decisión importante*, *Dulcilandia*, Año 54, No. 537 (Abril), 38-42.
42. **MARTÍNEZ, E.V.** 1985. *¿Análisis sensorial?*, *Dulcilandia*, Año 54, No. 540 (Julio), 54-59.
43. **MAPIMPIANTI S.p. A.** 1989. *La producción de cereales para desayuno*, *Industria Alimentaria*, México D.F., México, Septiembre, 18-22.
44. **MATSON, K.** 1982. *Cereal Foods World*, 27(7), 207-210.
45. **MATZ, S. A.** 1993. *Snack Food Technology*, AVI Book, Nueva York, EEUUA, 3a. Ed.
46. **MERCIER, C., LINKO, P., HARPER, J. M.** 1989. *Extrusion cooking*, American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul Minnesota, EEUUA.
47. **MEUSER, F., WIEDMANN W.** 1989. *Extrusion Plant Design, Extrusion Cooking*, Ch. 5. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul Minn., EEUUA.
48. **MILATOVIC, L., MONDELLI, G.** 2000. *Pasta Drying Technology*, *Pasta Technology Today*, (3), 97-119.

49. **MILLER, R. C.** 1985. *Low Moisture Extrusion: Effects of Cooking Moisture on Product Characteristics*, J. Food Sci., 50, 249-253.
50. **MILLER, T.** 1992. *Probabilidad y estadística para ingenieros*, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, 4ª. Ed., México D.F., México, 208-272.
51. **MONTGOMERY, D.** 1991. *Diseño de Experimentos*, Grupo Editorial Iberoamericano, México D.F., México, 13-78.
52. **OKOS, M.** *Food Dehydration*, Handbook of Food Engineering, 437-545.
53. **PATON, D., SPRATT, W.A.** 1981. *Simulated approach to the estimation of degree of cooking of an extruded cereal product*, Cereal Chemistry, 58(3), 216-220.
54. **PAVAN MAPIMPIANTI.** 2001. *Snackfoods Basic Raw Materials (Publicación especial)*, Padova, Italia.
55. **PAVAN MAPIMPIANTI.** 2001. *Snack Pellets Drying Technology (Publicación especial)*, Padova, Italia.
56. **PEDRERO, D.L., PANGBORN, R.M.** 1989. *Evaluación sensorial de los alimentos. Métodos analíticos*, Ed. Alhambra Mexicana, 1ª Edición, 24-27, 37-54, 123-135.
57. **PÉREZ, R., RODRÍGUEZ, J.** 1988. *Condiciones óptimas de extrusión de mezclas maíz-sorgo usando como parámetro de evaluación las características reológicas de masas y tortillas elaboradas con las harinas extrudidas*, Tesis Profesional, Facultad de Química, UNAM, México, D.F., México, 71-78.
58. **POLLINI, C., de CINDIO, B., BRANCATO, B.** 1994. *Modellazione reologica nell'essiccazione di paste secche-* Tecnica Molitoria 45, 943-947.
59. **POTTER, N. N.** 1973. *La ciencia de los alimentos*, Ed. Edutex, 1ª. Ed. México D.F., México, 131-225.
60. **PRANDINI, F.** 1995. *Technologies for the Production of Pellets to be Utilized to obtain Snacks and Crackers*, Cooking Extrusion Techniques, EEUUA.

61. **SAGARPA**. 1994. *Producción y comercialización de trigo*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Subsecretaría de Planeación, 1987-1993, México D.F., México, 24-35, 80-87.
62. **QUAGLIA, G.** 1991. *Ciencia y tecnología de la panificación*, Ed. Acribia, Zaragoza, España, 1-28, 31-45, 107-115.
63. **RAUWENDAAL, C.** 1986. *Polymer extrusion*. Hanser Publishers, Nueva York, EEUUA.
64. **RAO, S. K., ARTZ, W. E.** 1989. *Effect of Extrusion on Lipid Oxidation*, J. Food Sci., 54(6), 1580-1583.
65. **RODRIGUEZ, D.** 1988. *La industria de frituras: empleo informal y modernidad*, UNAM, 1988, Instituto de Investigaciones Económicas, PUAL, México D.F., México, 12-15, 24-25.
66. **SÁNCHEZ, S.A.** 1993. *Estudio del uso de modelos de superficies de respuesta para correlacionar características sensoriales y de textura de masas y tortillas elaboradas con harinas de maíz extrudidas alcalinamente*. Tesis de maestría. Facultad de Química UNAM, México D.F., México, 9-18, 25-28, 32, 74-78, 106-107.
67. **SMITH, O. B.** 1974. *Versatility of texturizing by extrusion cooking*, 67th. Annual Meeting, American Institute of Chemical Engineers, Washington, D.C. EEUUA. Diciembre.
68. **SMITH, O. B.** 1976. *Why Extrusion Cooking?* Wenger International, Inc., Kansas City, MO., Vol. 21 No. 1, 4.
69. **STANLEY, D.W.** 1986. *Chemical and structural determinants of texture of fabricated foods*, Food Technology, Marzo, 65-76.
70. **STONE, H.** 1985. *Sensory Evaluation Practices*, Academia Press Inc., EEUUA. 89-92, 227-239.
71. **T500 PURATOS**, 2002. México, *Guía de Panificación (Publicación especial)*.

72. **VANCE, G. C., SURMACKA, A.S.** 1973. *Guidelines to training a texture profile panel*, Journal of Texture Studies, 4, 204-223.

73. **WHALEY, M.G.** 1995. *Using Model Based Controls in Cereal Drying – Cereal Foods World*, 40(1), 19–22.