

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES EN LA ETAPA DE COCCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE HARINA PRECOCIDA DE MAÍZ.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br.: Bogado P. Miguel A.
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES EN LA ETAPA DE COCCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE HARINA PRECOCIDA DE MAÍZ.

TUTOR ACADÉMICO: MSc. Carolina Pfaff
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Víctor Egui

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br.: Bogado P. Miguel A.
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2009

Caracas, Noviembre de 2009

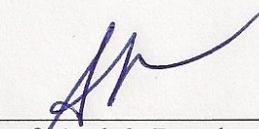
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Miguel Bogado, titulado:

“Estudio de las condiciones en la etapa de cocción para la producción de harina precocida de maíz”

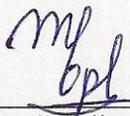
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Amelia Estévez
Jurado



Prof. Andrés Rosales
Jurado



Profa. Carolina Pfaff
Tutor Académico



Ing. Víctor Egui
Tutor Industrial

Aquí se piensa, también aquí se lucha y aquí se ama

Amado Nervo.

A mis padres, hermanos y vecinos

...Logros inspirados y dedicados a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiarme en todo momento de mi vida y permitirme realizar todas mis metas.

A la empresa Alimentos Polar Comercial Planta Turmero por darme la oportunidad de realizar este trabajo, a todas las personas que laboran en ella, en especial a quienes me ayudaron en la construcción del equipo piloto y a todo el equipo que integra la gerencia de desarrollo de cereales y derivados.

Al Ing. Víctor Egui por sus valiosos consejos, enseñanzas, motivación durante toda la realización del proyecto. Gracias!!

A la Ing. Johanna Salinas por ayudarme a desenvolverme en el laboratorio de desarrollo de cereales y derivados y sobre todo por ayudarme a entrar al mundo de los alimentos.

A la profesora Carolina Pfaff, por aceptar ser mi tutora industrial a pesar de poseer pocos conocimientos en el área de alimentos, por estar pendiente y ayudarme en todo momento.

A la Profa. Amelia y al Prof. Rosales por su disponibilidad en todo momento.

A mi familia por brindarme su apoyo y cariño en todo momento, por formarme en el ser humano que soy y por luchar día a día para salir adelante.

A mis vecinos Merly, Nelson y José Luis por apoyarme y ayudarme a tener una herramienta valiosa hoy en día (Internet) y sobre todo por ser excelentes personas.

Un muy especial e infinito agradecimiento para mi novia, amiga y compañera de la vida a quien quiero tanto, Mayra Analuisa quien participó activamente en la elaboración de este Libro. Gracias.

Bogado P. Miguel A.

***Estudio de las condiciones en la etapa de cocción para la producción
de harina precocida de maíz***

**Tutor Académico: Profa. Carolina Pfaff. Tutor Industrial: Ing. Víctor Egui.
Tesis. Ciudad, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.
Año 2009, 98 p.**

Palabras Claves: Maíz, grit, acondicionamiento del grano, gelatinización, harinas.

Se realizó un estudio de las condiciones de procesamiento y características de productos intermedios en la etapa de laminación para la producción de harina precocida de maíz donde se obtuvieron las variables de mayor influencia en el proceso: Tamaño de partícula (T_p), Tiempo de residencia (t) y relación de agua a grit (r). Obtenidas las condiciones y características del proceso de planta se produjo harina experimental mediante un equipo a escala piloto y se destacaron las semejanzas y diferencias en relación a la de planta. Una vez estandarizado el proceso piloto, a fin de conocer los efectos de las variables sobre las características de la harina precocida de maíz, se elaboró un diseño factorial completo de 2^3 , del cual se construyó un modelo de regresión lineal multivariante y se determinó que, dentro del ámbito del estudio, la relación de agua a grit es la variable de mayor efecto sobre la expansión de la harina precocida de maíz.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I_FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
I.1. Planteamiento del problema.....	4
I.2. Objetivos	6
CAPÍTULO II_MARCO TEÓRICO	
II.1. Maíz.....	8
II.2. Almidón.....	12
II.3. Harina precocida de maíz	21
II.3 Antecedentes.....	27
CAPÍTULO III_METODOLOGÍA	
III.1.- Toma de muestras	30
III.2.- Registro de variables de proceso y caracterización de productos intermedios del proceso de laminación.....	31
III.3.- Pruebas experimentales en el laboratorio	35
CAPÍTULO IV_DISCUSIÓN DE RESULTADOS	41
IV.1.- Registro de variables de proceso	42
IV.2.- Caracterización de productos del proceso de laminación.....	45
IV.3.- Pruebas experimentales en el laboratorio	50
CAPÍTULO V_CONCLUSIONES.....	62
CAPÍTULO VI-- RECOMENDACIONES	65
CAPÍTULO VII_BIBLIOGRAFÍA	67
CAPÍTULO VIII_APÉNDICES	
1.- Equipo piloto	72
2.- Diagramas de frecuencia de las variable de proceso y de los productos intermedios	73

3.- Cálculos Tipos 77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Estructura anatómica de un grano de maíz..... 9

Figura 2.- Tipos de maíz 12

Figura 3.- Amilosa y Amilopectina..... 13

Figura 4.- Esquema de la organización del gránulo de almidón 14

Figura 5.- El gránulo de almidón en las etapas de gelatinización y su aspecto bajo luz polarizada 15

Figura 6.- Curvas de transición de fases 17

Figura 7.- Curva de empastamiento o amilograma generado por el RVA..... 19

Figura 8.- Cubo de fluido 20

Figura 9.- Enfriador vertical de lecho por gravedad con rejillas 24

Figura 10.- Medición de la expansión con el consistómetro USDA..... 26

Figura 11.- Corrientes principales del proceso de laminación..... 32

Figura 12.- Esquema del equipo empleado para las pruebas piloto 35

Figura 13.- Esquema empleado para la producción de hojuela en planta piloto..... 37

Figura 14.- Distribución de frecuencias para el flujo de acondicionamiento de agua.43

Figura 15.- Registro de secuencial del flujo de agua de acondicionamiento..... 44

Figura 16.- Distribución de frecuencia flujo de proceso..... 44

Figura 17.- Distribución de tamaño de partículas para el grit procesado industrialmente..... 45

Figura 18.- Registro secuencial del tamaño de partículas por mallas. 46

Figura 19.- Diagrama de frecuencia para la expansión de las hojuelas. 48

Figura 20.- Perfil amilográficos del producto en distintas etapas del proceso..... 49

Figura 21.- Perfil de Viscosidad a 30° C para las distintas hojuelas y grit. 50

Figura 22.- Viscosidad a 30° para las hojuelas producidas a escala piloto..... 53

Figura 23.- Perfiles de tamaño de partículas empleados en pruebas pilotos..... 55

Figura 24.- Representación tridimensional de los valores de viscosidad final a 30 °C	58
Figura 25.- Equipo empleado para las pruebas piloto.....	72
Figura 26.- Diagrama de frecuencia del grit entrando a acondicionamiento.	73
Figura 27.- Diagrama de frecuencia del grit cocido.....	73
Figura 28.- Diagrama de frecuencia de la hojuela a la salida de la secadora.....	74
Figura 29.- Diagrama de frecuencia de la hojuela a la salida de la enfriadora.	74
Figura 30.- Diagrama de frecuencia de la humedad del grit cocido.	75
Figura 31.- Diagrama de frecuencia de la humedad de la hojuela laminada.	75
Figura 32.- Diagrama de frecuencia de la humedad de la hojuela a la salida de la secadora.....	76
Figura 33.- Diagrama de frecuencia de la humedad de la hojuela a la salida de la enfriadora.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Composición del endospermo.....	9
Tabla 2.- Propiedades físicas del maíz.....	10
Tabla 3.- Influencia de la amilosa y amilopectina en la Temp. de gelatinización	13
Tabla 4.- Requisitos Físico-químicos de la harina precocida de maíz.....	25
Tabla 5.- Tamices empleados en el análisis granulométrico.....	32
Tabla 6.- Perfiles de viscosidad: Standard 1 y viscosidad 30°.....	34
Tabla 7.- Matriz empleada para el diseño factorial.....	38
Tabla 8.- Perfil de temperatura en distintas etapas de la laminación.	42
Tabla 9.- Tiempos de residencia del proceso.	45
Tabla 10.- Humedades a distintas etapas del proceso de laminación.	47
Tabla 11.- Resultados analíticos para la viscosidad a 30° en distintas etapas del proceso	50
Tabla 12.- Comparación de equipo de proceso industrial y piloto	51
Tabla 13.- Valores de parámetros de ajuste de proceso piloto.....	52

Tabla 14.- Resultados analíticos de la viscosidad a 30° .	53
Tabla 15.-Valores experimentales seleccionados para las variables del proceso piloto.	54
Tabla 16.-Tratamientos experimentales.....	56
Tabla 17.-Resultados analíticos para la Viscosidad a 30° C en pruebas experimentales	56
Tabla 18.- Coeficientes para el modelo de regresión multivariante.....	57

INTRODUCCIÓN

La harina precocida de maíz es un rubro de alto consumo en Venezuela ya que muchas recetas tradicionales tal como la arepa, la empanada, entre otras, son elaboradas utilizando esta harina.

El proceso de producción de harina precocida de maíz comprende múltiples etapas. Inicialmente el grano de maíz es procesado por la molienda y secado para obtener el grit acabado. El grit se acondiciona primero con agua y luego con vapor (cocción), posteriormente mediante la laminación, se forman hojuelas para finalmente molerlas y obtener el producto.

El proceso no se encuentra automatizado, requiere de operadores que basados en su propia experiencia intervienen el proceso a fin de corregir desviaciones del producto sin embargo muchas veces los cambios no son de la magnitud requerida, por lo que es necesario plantear mejoras para las plantas existentes o bien proporcionar herramientas a dichos operadores. Para lograr esto es necesario conocer como el producto responde ante cambios que se efectúen sobre el proceso a fin de mantener las especificaciones, bien sea deseadas o exigidas, de la harina precocida de maíz.

Si bien existen muchos trabajos acerca de las condiciones de procesamiento de cereales, no existe ninguno orientado hacia el procesamiento del maíz para obtener harina precocida.

De esta manera en este trabajo se estudia la etapa de cocción y de laminación, estas etapas generan el carácter de formación de masa y absorción de agua de la harina. Las experiencias se realizan a escala de laboratorio a fin de tener conocimiento de los efectos de las variables de proceso sobre las variables controladas para poder plantear posibles soluciones.

El estudio se divide en tres secciones, inicialmente se hace una recopilación teórica de los aspectos relacionados con: la materia prima y unidades de proceso. Luego se les hace un seguimiento a los distintos parámetros y condiciones de la materia prima y a las características de productos intermedios y finales de la etapa de laminación, para conocer las condiciones normales de procesamiento.

Finalmente se expone la parte experimental. Donde primero se presenta la configuración inicial (puesta a punto) del equipo de laboratorio para obtener una hojuela semejante a la de planta. Posteriormente, se describe el experimento factorial en el cual se somete al grit a distintas condiciones de cocción para obtener hojuelas a escala de laboratorio y con esto conocer los efectos y relaciones de las características del producto ante los cambios combinados de las condiciones de procesamiento.

Capítulo I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La harina precocida de maíz es un producto de alto consumo en Venezuela por ser un ingrediente importante en una amplia variedad de recetas.

El proceso de producción industrial de harina precocida de maíz proviene de la preparación artesanal de las arepas. Dicho proceso, comprende siete etapas. En la primera etapa denominada desgerminación, se extrae la concha y el germen del grano de maíz para obtener el grit. Posteriormente, en la segunda etapa llamada laminación se realiza la cocción del grit, empleando para ello vapor y la conversión del grit a hojuela húmeda por medio de unos rollos laminadores, esta etapa es responsable del carácter de formación de masa y absorción de agua de la harina. Luego en las siguientes etapas la hojuela es secada, enfriada, premolida para facilitar su almacenamiento y luego pasa a molienda donde también se enriquece con hierro y vitaminas para obtener finalmente la harina que es empacada.

Sin embargo el proceso no es totalmente automatizado por lo que se requiere la intervención de operadores quienes apoyados en análisis físico-químicos y evaluaciones sensoriales toman decisiones basados en su experiencia previa para emprender acciones a fin de corregir las eventuales desviaciones de las especificaciones del producto. No obstante la magnitud de las acciones generalmente no son las más apropiadas, por lo que la desviación no es inmediatamente corregida.

En vista de esto es necesario mejorar el proceso bien sea tecnológicamente o proporcionar herramientas que permitan al operador ejecutar las correcciones de

manera efectiva. Así de esta manera hacer más eficiente y elevar el rendimiento del proceso.

Sin embargo, antes de cualquier cambio en el proceso para alcanzar una mejora, es necesario conocer los efectos de las variables de proceso (variables manipuladas, perturbaciones) sobre las variables controladas.

Las principales variables controladas del proceso son la expansión y separación de agua tanto de la hojuela como de la harina precocida de maíz. Estas variables reflejan tanto los cambios producidos en el proceso como el desempeño del producto final. Por lo que, toda planta productora de harina precocida de maíz debe controlar la expansión de la misma y además, porque existe una norma legal vigente que impone un valor máximo para dicha variable.

Las variables de expansión y separación son medidas del grado de cocción y de la capacidad de absorción de agua respectivamente, por lo que desviaciones de los límites prefijados podrían ser atribuidos a la etapa de laminación. En base a esto, se plantea un estudio en la etapa de laminación para encontrar las relaciones entre las variables de control y las variables de proceso. El estudio tendrá como variables de respuesta a las variables de control de proceso.

Cabe destacar que efectuar el estudio en planta implicaría altas pérdidas de materia prima y de horas de producción, por lo que se realizará este trabajo a escala de laboratorio.

I.2.OBJETIVOS

En esta sección se muestran los objetivos que se busca alcanzar con este Trabajo Especial de Grado:

Objetivo General:

Estudiar los efectos de las condiciones de proceso en la etapa de cocción para la laminación del grit de maíz en la producción de harina precocida.

Objetivos Específicos:

- ✓ Determinar las condiciones estándar de procesamiento industrial, tales como: temperatura y cantidad de agua para acondicionamiento, tiempo y temperatura de cocción.

- ✓ Establecer las propiedades amilográficas y características físicas de: la materia prima empleada y los productos intermedios y finales obtenidos en la laminación industrial.

- ✓ Obtener las condiciones y/o configuración (Puesta a punto) del equipo de laboratorio que genere una hojuela de características similares a la obtenida industrialmente.

- ✓ Comparar y analizar los efectos de distintas condiciones experimentales sobre las características y propiedades de los productos finales.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1. MAÍZ

Se denomina maíz al conjunto de granos procedentes de cualquier variedad o híbrido de la gramínea, planta que produce una semilla rica en carbohidratos, aceites y proteínas, “*Zea mays*” (COVENIN, 1987). Los granos de maíz son clasificados botánicamente como cariopsis, una semilla cuyo pericarpio se adhiere a la verdadera semilla, éste contiene un embrión completo y todas las funciones estructurales, nutricionales y enzimáticas requeridas para el crecimiento y el desarrollo dentro de una planta (Lorenz y Kulp, 1991).

II.1.1 Estructura Anatómica

Los granos de maíz son las semillas más grandes de los cereales con un peso entre 250-300 mg cada uno. Estas semillas son planas debido a la presión que ejercen los granos adyacentes durante el crecimiento en la mazorca. Como se puede ver en la figura 1, el grano consta de cuatro partes: El endospermo, es el reservorio de nutrientes para ayudar a la germinación y comprende un 82,6% del grano de maíz; el germen o embrión, comprende 11,1% y posee un alto contenido de aceite, proteínas, azúcares y vitaminas con poco almidón; la concha o pericarpio, cubierta protectora más externa que resiste la penetración por el agua (5,3%); y la punta de la cubierta, la cual provee el punto de unión entre el grano y la mazorca de maíz; (Lorenz y Kulp, 1991) ,(Smith, Beltrán y Bunge, 2004).

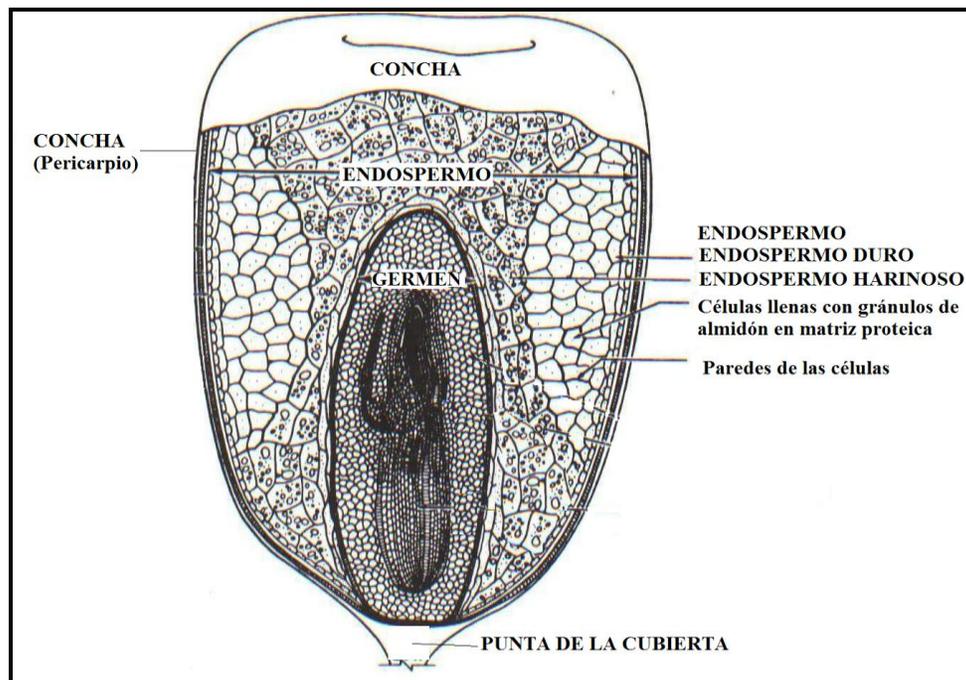


Figura 1 Estructura anatómica de un grano de maíz (Lorenz y Kulp,1991)

El endospermo es la fracción más grande del grano, y se compone mayoritariamente de almidón tal como lo indica la tabla 1. Las células del endospermo están empacadas con gránulos de almidón incrustados en una matriz de proteína amorfa (Lorenz y Kulp, 1991). El endospermo se divide en dos: endospermo duro y harinoso, como se ve en la figura 1, donde se aprecia que los gránulos de almidón tienen un cambio significativo de tamaño: de pequeños y redondos en el endospermo harinoso a grandes y poliédricos en el endospermo duro (Smith y otros, 2004).

Tabla 1 Composición del endospermo (Lorenz y Kulp, 1991)

Componente	Porcentaje (%)
Almidón	87,6
Proteína	8,0
Fibra	3,2
Grasa	0,8
Otros	0,4

II.1.2 Propiedades del maíz

La mayoría de las propiedades del maíz, varían por diferencias de contenido de humedad, de una variedad a otra, de año a año, y de una región de producción a otra.

Los tamaños del grano, forma, densidad y porosidad (volumen vacío), que se muestran en la tabla 2, son parámetros utilizados en el estudio de la hidrodinámica, aerodinámica, y transferencia de masa y calor. Dichos parámetros son importantes a tomar en cuenta en el diseño de equipos de manejo (tuberías de aspiración, alimentadores, correa transportadora, etc.) y almacenaje (recipientes, silos, etc.).

Una propiedad importante es la conductividad térmica, ya que, el maíz es un conductor pobre de calor, como lo indica su valor respectivo en la tabla 2, al compararlo con un ladrillo común, el cual posee una conductividad térmica de 0,727 W/m.°C, se aprecia, que si se transfiere calor a un recipiente de maíz, éste se disipará muy lentamente (Watson y Ramstad, 1987).

Tabla 2 Propiedades físicas del maíz (Lorenz y Kulp, 1991)

Propiedad	Valor típico
Densidad aparente (kg/m ³)	
Maíz Blando en concha	448,5
Maíz en concha	448,5
Maíz dentado en concha	727,2
Gravedad Específica (kg/m ³)	1260
Ángulo de reposo(grados)	35
Volumen vacío (%)	42,3
Conductividad Térmica (W/m °C)	0,164
Calor Específico (kJ/kg.°C)	2,026

De igual manera, el contenido de humedad del maíz, es un parámetro importante, debido a que altos contenidos de humedad promueven un rápido deterioro del grano y a su vez el resto de las propiedades dependen de éste. Cabe destacar que

el maíz es un material higroscópico, por lo que pierde (desorbe) o gana (adsorbe) humedad dependiendo de si su presión de vapor de agua es mayor o menor que la del ambiente, por ello, cuando se almacena el maíz es importante controlar la humedad del ambiente. Adicionalmente cada componente como lo son proteína, almidón, grasa o fibra tienen diferente afinidad por la humedad (Lorenz y Kulp, 1991). Especialmente el germen absorbe de tres a cinco veces más agua que el endospermo (Watson y Ramstad, 1987).

II.1.3 Tipos de maíz

De acuerdo a COVENIN (1987), hay tres principales tipos de maíz, los cuales son mostrados en la figura 2 y se describen a continuación:

a) Duro o córneo

Es una variedad con alto grado de dureza y de apariencia translúcida (COVENIN, 1987). Éste posee una capa de endospermo vítreo, duro y grueso que rodea un endospermo central, pequeño, suave y granular (Lorenz y Kulp, 1991).

b) Semiduro o Dentado

Esta variedad presenta características intermedias entre el maíz córneo y el amiláceo (COVENIN, 1987). Se caracteriza por la presencia de endospermo duro a los lados y en la parte trasera de los granos, mientras que el núcleo central es suave y harinoso. El endospermo suave se extiende a la corona, donde colapsa para formar una concavidad (Lorenz y Kulp, 1991).

c) Blando o Amiláceo

Es un grano de consistencia blanda, apariencia opaca y generalmente de tamaño grande, se le conoce también como harinoso (COVENIN, 1987). Se caracteriza por tener un endospermo suave a través del grano (Lorenz y Kulp, 1991).

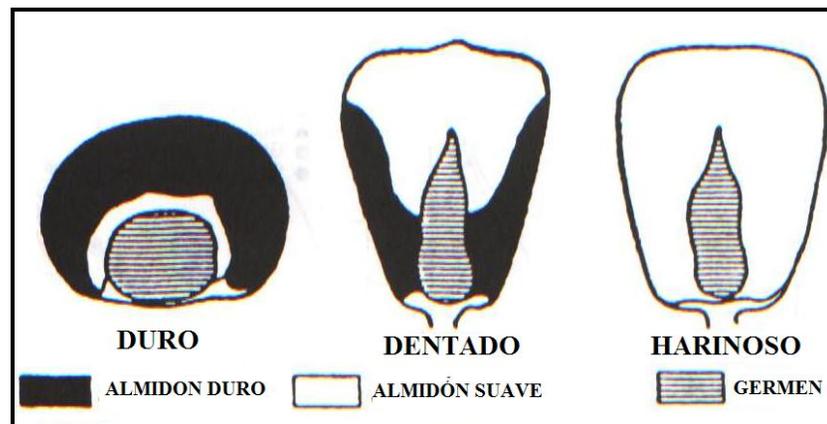


Figura 2 Tipos de maíz (Lorenz y Kulp, 1991)

II.2. ALMIDÓN

Como se muestra en la tabla 1, el almidón constituye la mayor parte del endospermo, por lo que el conocimiento de sus propiedades y características es importante para el entendimiento del procesamiento y comportamiento de los productos a base del maíz, en especial los que usan al endospermo como materia prima como lo es la producción de harina precocida de maíz.

El almidón está compuesto principalmente por dos polisacáridos muy similares, la amilosa y la amilopectina (Badui, 2006), los cuales tienen como unidad fundamental la D-glucopiranososa unidos por enlaces glucosídicos α -1,4 y α -1,6 (Atwell y Thomas, 1999).

Atwell y Thomas (1999) definen a la amilosa como esencialmente un polímero lineal. Sin embargo hay evidencia reciente que indica la presencia de algunas ramas, este biopolímero puede ser mostrado de forma helicoidal. Ésta hélice es capaz de formar complejos con grasa u emulsificantes alimenticios y de ocasionar desplazamientos de la temperatura de gelatinización, alteración de los perfiles de textura y viscosidad de la pasta resultante y limitar la retrogradación. Por otra parte la amilopectina contiene ramificaciones que le dan una forma molecular semejante a la de un árbol tal como se ilustra en la figura 3, las ramas están unidas al tronco central, semejante a la amilosa, por enlaces α -1,6, (Badui, 2006).

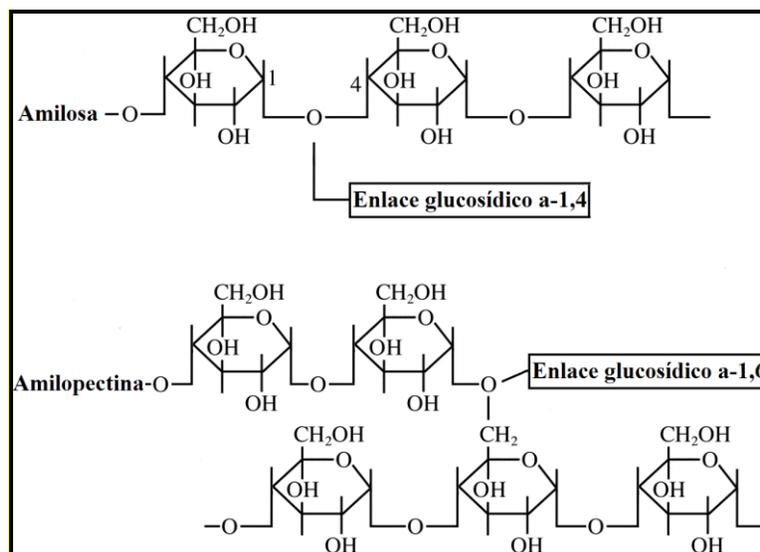


Figura 3 Amilosa y Amilopectina (Eliasson, 2004)

La tabla 3 muestra la relación entre la amilopectina y amilosa, que depende de la fuente botánica de la que provengan, e influye de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos, principalmente mediante su capacidad de hidratación y gelatinización (Badui, 2006).

Tabla 3 Influencia de la amilosa y amilopectina en la Temperatura de gelatinización de diversas fuentes botánicas (Badui S., 2006)

Tipo	Amilopectina (%)	Amilosa (%)	Temperatura de gelatinización Tg(°C)
Maíz	69-74	26-31	62-72
Maíz rico en amilosa	20-45	55-80	67-80
Papa	73-77	18-27	58-67
Arroz	83	17	62-78
Tapioca	82	18	51-65
Maíz céreo	99-100	0-1	63-72
Sorgo Céreo	99-100	0-1	67-74
Trigo	76	24	58-64

La amilosa y amilopectina no existen libres en la naturaleza sino como componentes de pequeños corpúsculos discretos, con diámetro de 5 a 20 µm, denominados gránulos de almidón. Estos gránulos tienen distintas formas como

esferas, elipses, polígonos etc. Dentro de éstos se localizan zonas cristalinas de moléculas de amilosa y zonas amorfas causadas principalmente por la amilopectina. Las zonas están dispuestas en capas alternantes amorfas y cristalinas organizadas radialmente donde la amilosa y amilopectina se entrelazan entre sí, sin embargo las moléculas de amilosa no se unen entre sí, todo esto mantiene la integridad de la estructura del gránulo tal como se muestra en la figura 4.

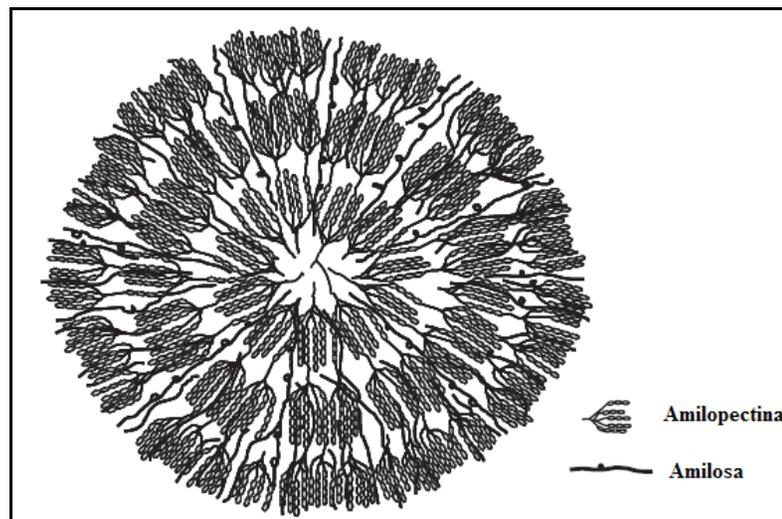


Figura 4 Esquema de la organización del gránulo de almidón (Be Miller y Wistler,2009)

II.2.1. Fenómenos físico-químicos

a) Gelatinización

El almidón es una estructura muy organizada, por la alta cristalinidad (hasta 45 %) que refleja su patrón de rayos X así como poco soluble en agua fría (Be Miller J y Whistler R, 2009), sin embargo al calentar esta suspensión el agua difunde dentro del gránulo y a medida que se incrementa la temperatura el agua continua difundiendo hacia dentro y sin observarse un aumento en la viscosidad de la suspensión como se aprecia en el punto “a” de la figura 5, pero al llegar a cierta temperatura, conocida como Temperatura de gelatinización la cual depende de la fuente botánica que provenga el almidón, se funde la estructura cristalina y se evidencia un incremento importante de la viscosidad, representado en el punto “b” de la misma figura . Este evento origina la pérdida del orden y se visualiza la pérdida de

birrefringencia, ésta es la propiedad que tienen los almidones al ser teñidos con yodo de exhibir una cruz de malta bajo luz polarizada debido a la diferencia de índices de refracción que tienen las zonas cristalinas y amorfas. Seguidamente la hidratación del gránulo continúa hasta alcanzar un máximo de volumen, punto “c” (Fig. 5), donde los puentes de hidrógeno entre las moléculas de glucosa se rompen dando lugar a la destrucción de la estructura del gránulo. Así finalmente las moléculas tanto de amilosa como amilopectina se dispersan en una solución, mostrado en el punto “d” de la figura 5.

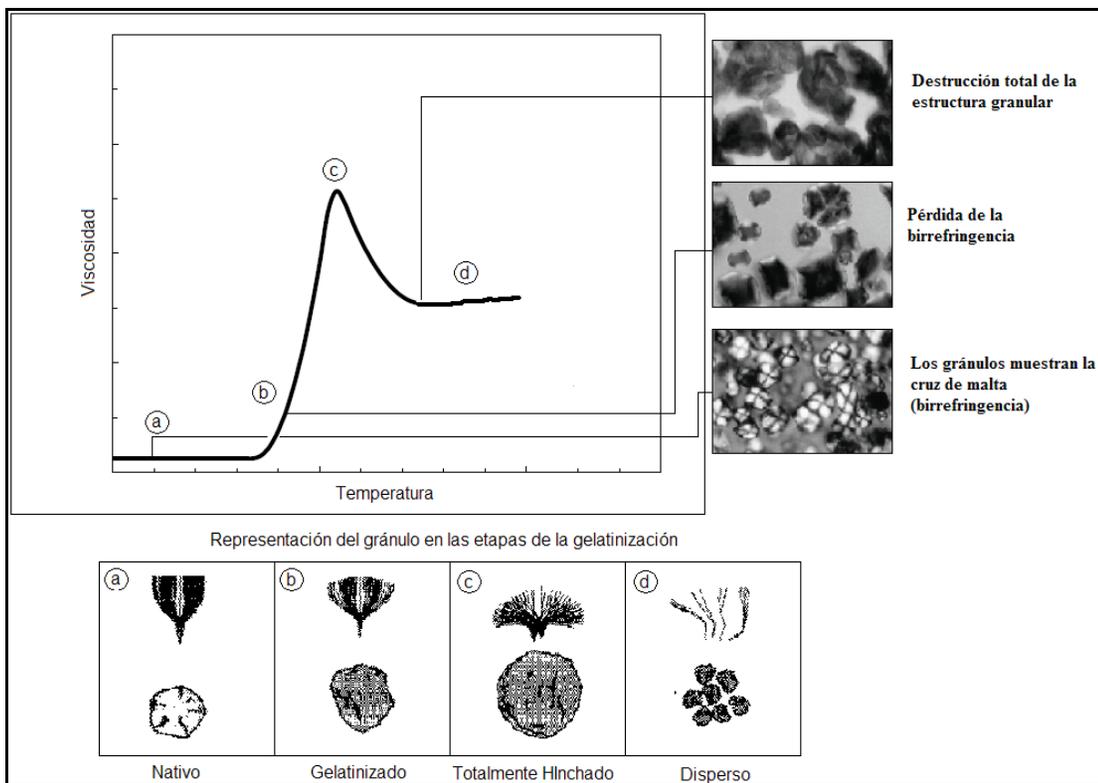


Figura 5 El gránulo de almidón en las etapas de gelatinización y su aspecto bajo luz polarizada

Tomando todo lo anterior en cuenta, podemos decir que la gelatinización se define como la destrucción del orden molecular en el gránulo junto con todos los cambios irreversibles en las propiedades tales como absorción de agua, viscosidad, hinchamiento granular, fundición de los cristales, pérdida de birrefringencia y solubilización del almidón. Este fenómeno también es conocido como empastamiento (Atwell y Thomas, 1999).

b) Retrogradación

La retrogradación se origina porque las cadenas lineales principalmente de amilosa se orientan de forma paralela y reaccionan entre sí por medio de los hidróxilos formando puentes de hidrógeno, ésto hace a las moléculas de amilosa insolubles y precipitan. Éste fenómeno depende de la temperatura del sistema y la concentración de amilosa por lo que cada almidón tendrá una tendencia diferente a retrogradar. La amilopectina es muy difícil que forme puentes de hidrógeno entre moléculas adyacentes por la presencia de las ramificaciones por lo que se le atribuye la retrogradación principalmente a la amilosa (Badui, 2006).

c) Transiciones de fase

De acuerdo a Strahm, B (1998), la ciencia de los polímeros puede ser utilizada para estudiar los cambios físicos asociados a la transición vítrea y transición de fusión de los biopolímeros como el almidón. Los principios de ésta ciencia son aplicables en materiales parcialmente amorfos tal como lo es el almidón.

Los materiales sólidos amorfos carecen de un orden molecular y existen en el estado vítreo con una viscosidad extremadamente alta y baja movilidad rotacional de las moléculas. Los materiales amorfos pueden ser suavizados por la temperatura o por plasticizadores. Como resultado de una plasticización por encima de su transición vítrea, la viscosidad disminuye dramáticamente, permitiendo un incremento en la movilidad molecular y movimientos traslacionales (Kaletunç, G y Breslauer, K , 2003).

La transición vítrea se define como aquella observada por un cambio en escalón de la capacidad calorífica. El cambio en la capacidad calorífica ocurre en un rango de temperaturas, este rango es característico de cada material amorfo. Dentro del rango de temperaturas un pequeño cambio en la temperatura puede resultar en cambios sustanciales en la viscosidad, movilidad molecular y propiedades mecánicas del material. A la temperatura media de dicho rango se conoce como Temperatura de transición vítrea (T_g). Dichos cambios permiten la transformación entre los sistemas: sólido, quebradizo, y vítreo, plástico, flexible y algunas veces inclusive sistemas

viscosos o de sirup. (Kaletunç, G y Breslauer, K , 2003). De igual manera existe otra transición que es la de fusión donde la parte cristalina del almidón es fundida y se logra un cambio del estado plástico al fundido dicho cambio se observa a una temperatura promedio conocida como temperatura de fusión (T_m) (Be Miller J y Whistler R, 2009).

Los plasticizadores incrementan la movilidad molecular y disminuyen las temperaturas del rango de transición vítrea (Kaletunç, G y Breslauer, K , 2003). Para que un compuesto actúe como plasticizador debe: a) ser capaz de mezclarse con el otro compuesto y formar una fase simple, b) poseer una temperatura de transición vítrea menor que la del polímero a ser plasticizado. El efecto del contenido de agua sobre la transición vítrea así como las fronteras de las fases para el almidón de maíz puede ser visualizado en la figura 6.

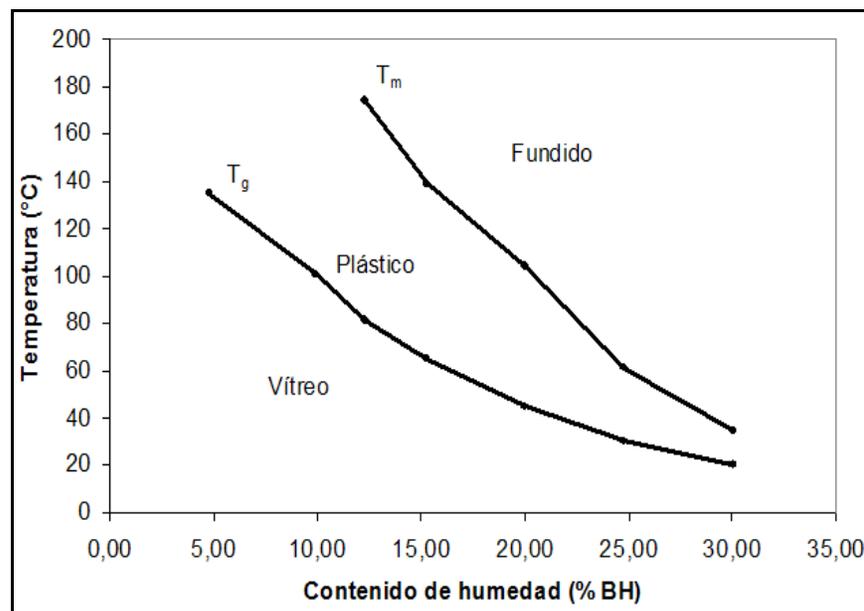


Figura 6 Curvas de transición de fases (Riaz, 2000)

II.2.2 Métodos de análisis

Existen distintos instrumentos y métodos que han sido desarrollados a lo largo de los años y han llevado a un mejor entendimiento de la estructura básica del almidón y los cambios que se llevan a cabo en presencia de agua, calor u otros

ingredientes alimenticios (Atwell y Thomas, 1999). Estos se mencionan a continuación:

a) Microscopía

Microscopía electrónica y de luz son herramientas valiosas en la caracterización del almidón y de productos alimenticios que contienen almidón.

i. Microscopía de luz

Esta es frecuentemente utilizada para definir el tipo de almidón y también para observar el tamaño y forma de los gránulos de almidón de diferentes fuentes. Se distingue la microscopía de luz polarizada, cuando el almidón es visto bajo éste microscopio todos los gránulos de almidón nativo aparentan brillar mientras exhiben una cruz de malta oscura. Este fenómeno se conoce como birrefringencia como un indicador del grado de orden en los gránulos. También está la técnica de microscopía de luz con coloración de yoduro ésta provee información acerca del contenido de amilosa y amilopectina

ii. Microscopía electrónica de barrido

La Microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) permite caracterizar la forma y superficie del almidón al ser vistos en tres dimensiones. Mediante ésta técnica se aprecia que los gránulos de almidón del maíz dentado son angulares.

b) Cristalografía de Rayos X

Cuando un cristal es irradiado con rayos X, estos se dividen para formar un patrón distintivo de la estructura cristalina, por lo que esta técnica ha sido utilizada para estudiar la naturaleza cristalina del almidón.

c) Mediciones Basadas en la Viscosidad

Los cambios en la viscosidad del medio con almidón durante su calentamiento son medidos comúnmente con instrumentos como el viscoamilógrafo y el analizador rápido de viscosidad (RVA). Estos viscosímetros ejecutan programas de enfriamiento, calentamiento y mezclado controlados que generan perfiles de

gelatinización y empastamiento altamente reproducibles, como se muestran en la figura 6. Dado el número de condiciones de cocción que pueden ser utilizados para gelatinizar el almidón, una gran variedad de perfiles de viscosidad pueden ser obtenidos empleando distintos programas de calentamiento y enfriamiento. El RVA se ha vuelto muy popular para el análisis de la gelatinización y empastamiento del almidón (Atwell y Thomas, 1999).

II.2.3. Analizador rápido de viscosidad

a) Principio de operación

El RVATM es un viscosímetro rotacional que es capaz de grabar la viscosidad de una muestra bajo condiciones de temperatura controlada. Este viscosímetro mantiene las muestras suspendidas en un solvente durante la prueba y aplica un grado de corte que coincide con las condiciones de procesamiento. La combinación de cizallamiento, calentamiento y enfriamiento, aplicado a lo largo del tiempo, crea una curva de viscosidad para el material, puede verse en la figura 7 donde muestra un número característico de inflexiones, picos y mínimos los cuales son utilizados para caracterizar el material bajo la prueba (Crosbie y Ross, 2007).

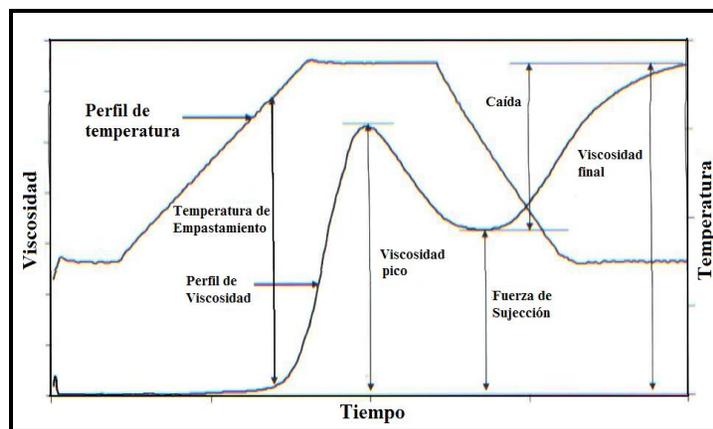


Figura 7 Curva de empastamiento o amilograma generado por el RVATM (Crosbie y Ross, 2007)

b) Determinación de la viscosidad

La viscosidad se define como la resistencia de un fluido a fluir. Si suponemos un cubo de fluido como el de la figura 8, ubicado entre dos placas paralelas, y uno de ellos se mueve con respecto al otro y como se supone que el fluido se adhiere a cada

placa, el movimiento de las placas genera una fuerza en dirección contraria que ofrece resistencia a fluir. Para un fluido Newtoniano es bien conocido que:

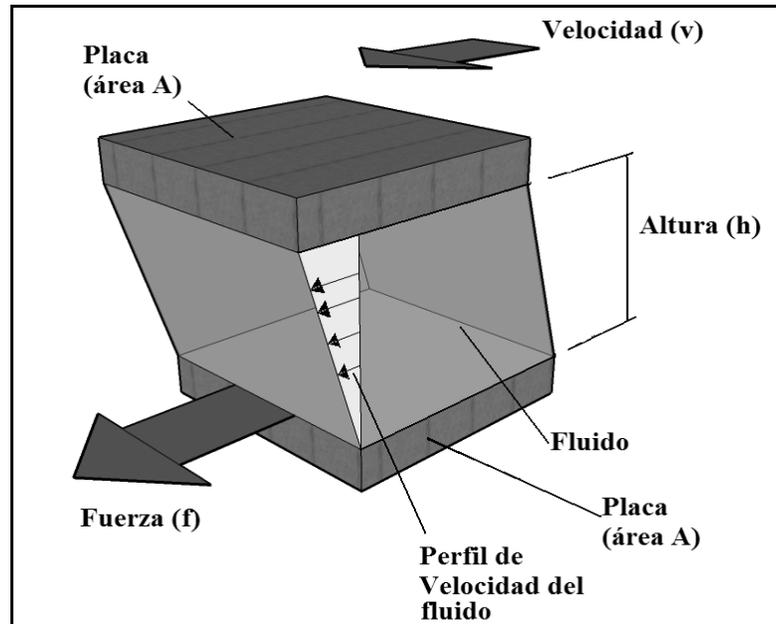


Figura 8 Cubo de fluido (Crosbie y Ross ,2007)

$$\eta = \frac{fh}{Av} \quad (\text{Ec.1})$$

En la ecuación 1, f= fuerza, h= la altura, A= área de las placas y v= velocidad de las placas y si se define:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{F}{A} \quad \text{y Velocidad de deformación} = \frac{v}{h} ;$$

Se tiene a la viscosidad como:

$$\eta = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Velocidad de deformación}} \quad (\text{Ec.2})$$

De acuerdo a Crosbie y Ross (2007) en el RVA, la resistencia a fluir de la muestra es medida por la paleta de rotación en la muestra a una velocidad conocida. La resistencia del fluido crea un torque en dirección opuesta a la rotación. Para mantener la velocidad constante, el impulsor del motor de las paletas debe generar un torque igual u opuesto el cual es convertido en una lectura de viscosidad. Para ello de

acuerdo a lo visto en las ecuaciones (1,2) la velocidad de deformación debe ser conocida. Así para este viscosímetro queda la velocidad establecida por el giro de la paleta y la distancia por la separación de la paleta a la superficie interna del recipiente que contiene la muestra.

II.3. HARINA PRECOCIDA DE MAÍZ

La harina de maíz precocida “es el producto obtenido a partir del endospermo de granos de maíz (*Zea mays* L) clasificados para consumo humano, que han sido sometidos a procesos de limpieza, desgerminación, precocción y molienda” (COVENIN ,1996).

II.3.1 Proceso de producción

A principios del siglo XX se introdujo el desgerminador Beal lo que originó los sistemas de atemperado y desgerminado. Esta tecnología facilitó la producción de productos de maíz de contenidos de grasa más bajos, vida útil más larga y sirviendo a mercados más lejanos (Lorenz y Kulp, 1991).

El sistema de atemperado y desgerminado mediante tratamientos físicos y mecánicos logra: (a) remover esencialmente todo el germen y la concha dejando el endospermo lo más libre posible de aceites y fibras, (b) recuperar al máximo rendimiento de endospermo como partículas grandes limpias y (c) recuperar al máximo rendimiento de germen como partículas grandes limpias (Lorenz y Kulp, 1991).

La harina precocida de maíz se obtiene mediante el proceso de molienda seca con desgerminación. Y se resume mediante 5 etapas que se indican en los siguientes apartados.

a) Recepción y almacenamiento

El maíz proveniente del campo contiene materias extrañas como son: palos, metales, trozos de tusa, semillas, mecates, entre otros, así como también contiene un elevado grado de humedad (20%-24%), por lo que se le aplica una limpieza que permite eliminar todas estas impurezas y un secado adecuado, se realiza por medio de

secadores de flujo cruzado, que elimina el exceso de humedad para así prevenir el crecimiento microbiano. En esta etapa se acondiciona el maíz de tal forma que pueda conservarse en el tiempo y de esta manera, proporcionarlo adecuadamente a la planta, tanto en cantidad como en calidad, asegurando así la producción en el tiempo que sea necesario.

b) Desgerminación

También conocido tradicionalmente como “pilado”, se refiere al “proceso de separación de la concha (pericarpio) y del germen por medios mecánicos para la obtención del endospermo o grit”. Esta separación no es perfecta por lo que existe un parámetro de rendimiento definido como la relación de Endospermo aprovechable con respecto al grano de maíz entero.

c) Laminación

Esta etapa consiste de una serie de unidades de tratamiento térmico y mecánico las cuales convierten el grit en hojuela. Estas unidades se mencionan a continuación:

c.1) Acondicionamiento

El grit obtenido en la etapa previa se mezcla con agua y éste es alimentado haciendo uso de un tornillo sin fin en unos bins, o también llamados temperbins, grandes recipientes cilíndricos verticales. En esta unidad se ajusta el nivel de humedad de la mezcla agua/grit y es mantenida durante un período de tiempo que permita al agua distribuirse óptimamente cubriendo la superficie de todas las partículas para que ésta difunda hacia el interior de ellas (Lorenz y Kulp, 1991).

c.2) Precocción

Esta etapa es contigua a la previa. Los bins descargan el grit húmedo en otros recipientes verticales de sección transversal cuadrada (cocinas) donde se le aplica vapor saturado bien distribuido, lo cual aumenta la temperatura hasta alrededor de 100 °C, esto incrementa la velocidad de penetración del agua hasta el centro de cada

grano. De igual manera el almidón contenido en el endospermo a dichas temperaturas es levemente gelatinizado y experimenta transiciones de fase los cuales a su vez dependen del contenido de humedad.

Las etapas de acondicionamiento y precocción son necesarias puesto que incrementan la humedad y temperatura del endospermo para suavizar las partículas (Riaz, 2000). De igual manera facilita (disminución de la energía mecánica requerida) el proceso siguiente: laminación.

c.3) Laminación

El grit proveniente de las cocinas es presionado por un par de rodillos que giran en sentido contrario y mantienen entre sí una alta presión para formar una hojuela. Esta deformación mecánica fractura la estructura del almidón, lo que gelatiniza los almidones del endospermo confiriéndole la característica de absorción de agua. Debido a esta etapa es que la harina precocida de maíz es capaz de formar masa (COVENIN, 1996) (Speetjens, 2002). Los laminadores, consisten de dos rollos, uno de los cuales es ajustable de tal manera que la distancia entre ellos pueda ser fijada para producir una hojuela del espesor deseado (Fast y Caldwell, 2000).

c.4) Secado

Las hojuelas que provienen de los rollos laminadores poseen alto contenido de humedad y energía. Estas son condiciones favorables para que se produzca un grado no deseado de retrogradación, que origina la formación de nuevos puentes de hidrógeno y la compensación de sus cargas eléctricas evitando así la captación de moléculas de agua, esto origina una harina poco soluble en agua, es decir, incapaz de formar masa (Carpio, 1990). Para evitar esto se emplea el secado, éste reduce el contenido de humedad a alrededor de la mitad (12%) y detiene la retrogradación hasta el grado deseado (Carpio, 1990). El contenido de humedad se retira con un secador tubular directo, el cual emplea vapor como medio de calentamiento de un haz tubular donde el aire fresco del ambiente entra en contra corriente con la alimentación, se calienta y retira la humedad de las hojuelas, dentro del secador la operación se realiza a alrededor de los 70 -80 °C.

c.5) Enfriamiento

Las hojuelas una vez retiradas del secador se encuentran a temperaturas cerca de los 70-80 °C, a pesar de que la misma se ve reducida durante el transporte de una unidad a otra, es necesario enfriarlas y retirar cualquier contenido de humedad que ocasione más daño térmico a los gránulos de almidón. Esta se realiza utilizando un enfriador vertical de lecho por gravedad con rejillas, mostrado en la figura 9, que consiste en tres secciones verticales donde las hojuelas se desplazan en sentido descendente por las dos secciones más externas y el aire de enfriamiento circula transversalmente por las rendijas de las paredes más externas atravesando el lecho y se descarga por la sección central (Perry, Green, Maloney, 1998).

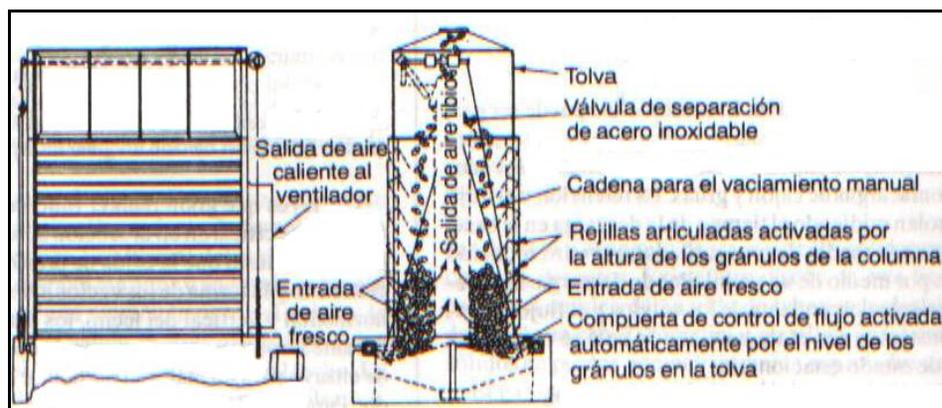


Figura 9 Enfriador vertical de lecho por gravedad con rejillas (Perry, Green , Maloney, 1998)

c.6) Pre-molienda

Las hojuelas una vez obtenidas poseen una densidad aparente muy baja, por lo que para su almacenamiento en silos es necesario reducir su tamaño para así aprovechar más el volumen de los silos. Para esto se aplica una molienda con poco daño mecánico la cual reduce el tamaño de la hojuela que hace su almacenaje más efectivo y facilita el primer paso por molienda (Alimentos Polar, 2008).

d) Molienda

Esta etapa constituye la parte final del proceso de la elaboración de harina precocida. Consiste en reducir las hojuelas premolidas hasta la granulometría

deseada o establecida mediante el uso de cuatro bancos de molinos con diferentes estrías y el uso de cernidores para clasificar el producto. Durante esta etapa la harina es enriquecida con vitaminas y finalmente es almacenada.

e) Empaque

Una vez obtenida la harina precocida de maíz, es empaquetada en contenedores de 1 Kg y éstos a su vez en fardos, que contienen 20 unidades de 1 Kg, los cuales se colocan en paletas para almacenarlos y así proceder finalmente a su distribución.

II.3.2 Características de la harina precocida de maíz

La harina precocida de maíz debe cumplir con los requisitos exigidos por la legislación vigente venezolana (COVENIN, 1996), entre los cuales a continuación se destacan los apartados de la normativa de especial interés en este trabajo:

- “7.2 Debe ser un producto de aspecto homogéneo, con color y sabor característicos.”
- “7.7 Cuando la harina de maíz se somete a operación de cribado, ésta debe atravesar en un 100% el tamiz de No. 20.”
- Físico-químicos, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4.- Requisitos Físico-químicos de la harina precocida de maíz (COVENIN, 1996).

Característica	Requisito
Humedad (% máx.)	13,5
Cenizas (% máx.)	1,0(*)
Grasa (% máx.)	2,0(*)
Proteína (% mín.)	7,0(*)
Expansión en cm,(máx.)	8,5

*Porcentaje en base seca

II.3.3 Expansión de la masa

Es un método de análisis de consistencia de la masa. Se basa en la propiedad de absorción de agua que poseen los almidones de maíz parcialmente gelatinizados. La consistencia se manifiesta por la mayor resistencia de la masa a expandirse al ser liberada del recipiente que la contiene. Se realiza empleando el método del consistómetro USDA (Bourne M, 2002) y de acuerdo a lo estipulado por la legislación venezolana se requiere de un cilindro de acero inoxidable el cual se coloca en el centro del papel calibrado con círculos concéntricos separados por 1 cm. El agua y la harina se mezclan adecuadamente y en la proporción indicada por la norma se coloca el cilindro en el centro del papel calibrado y se llena con la muestra (ver figura 10) posteriormente se retira el cilindro (ver figura 10) permitiendo que la masa se esparza por la superficie. Al cabo de un tiempo se procede a leer la distancia en centímetros en 8 distintos radios y se obtiene un promedio el cual corresponde al valor de la expansión (COVENIN, 1996).

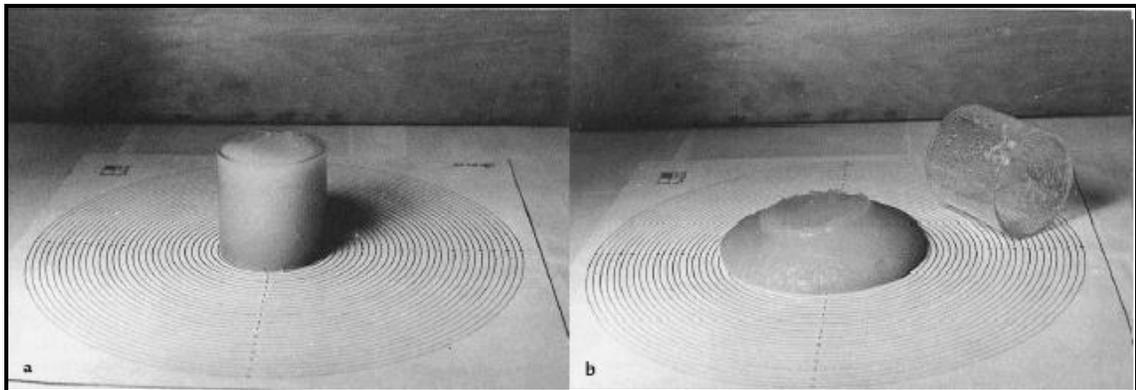


Figura 10 Medición de la expansión con el consistómetro USDA (Bourne M, 2002).

II.3 ANTECEDENTES

A lo largo de los años, científicos e ingenieros han realizado estudios relacionando las condiciones de procesamiento de cereales (o del almidón) y las características del producto final, en la búsqueda de mejorar la calidad de productos alimenticios. Existe poca información publicada acerca de trabajos sobre el proceso de producción de harina precocida de maíz, sin embargo la producción de ésta no dista mucho del procesamiento de otros cereales via extrusión, donde se emplea humedad, temperatura y daño mecánico lo que modifica las propiedades del almidón.

Hay Michelle (2002) observó los cambios micro-estructurales que sufre el gránulo de almidón de trigo bajo distintas condiciones de extrusión. Concluyendo que ciertas condiciones de temperatura, humedad y velocidad del extrusor son requeridas para la completa gelatinización del gránulo de almidón. De forma similar Pérez y colaboradores (2008) estudiaron los efectos de variables como temperatura y humedad del grit sobre la viscosidad de la dispersión de harina de un extruido de mezcla de cereales (maíz y soya) y obtuvieron las mejores condiciones para la extrusión.

Adicionalmente trabajos como el de Ponte-García y colaboradores (2008) verifican como el contenido de humedad modifica las propiedades como la dureza del endospermo de trigo, obteniendo que el incremento de la humedad aumenta la deformación mecánica, o bien disminuye la dureza del endospermo.

Desde otra perspectiva, se han realizado estudios de los biopolímeros donde se destaca la importancia de conocer los cambios de fases del material, en función de su humedad y temperatura para así: proporcionar un adecuado tratamiento al material, facilitar la molienda, adaptar el proceso a cambios de la materia prima y obtener las propiedades deseadas del extruido tales como textura (Strahm, 1998).

Los efectos térmicos sobre las propiedades fisico-químicas de la harina de maíz, causados al cocinar el maíz en agua hirviendo y con vapor demostraron que la viscoelasticidad de la masa de harina se ve afectada por el tratamiento térmico y a su

vez la estructura cristalina del almidón de maíz es disminuida (Bhattacharyya y colaboradores, 2007).

Ramirez-Wong y colaboradores (1994) exponen como el tiempo de cocción afecta la humedad de la masa, el índice de absorción de agua, entre otras, en el proceso de la nixtamalización para la elaboración de la masa de tortillas. Ellos aseguran que las características de textura son dependientes de su capacidad de retención de agua y éstas a su vez de las operaciones de cocción y molienda.

Otro estudio acerca de la influencia de las condiciones de proceso sobre las propiedades finales de la harina fue llevado a cabo por Sandoval Eduardo y colaboradores (2006), quienes verificaron que la adición de una etapa de reposo cambió las características, tal como la viscosidad aparente, de la harina precocida obtenida y lo atribuyeron a una reorganización de las moléculas de amilosa lo que produjo efectos significativos en la capacidad de absorción de agua de la harina.

Tim Baks y colaboradores (2008) midieron el grado de gelatinización para mezclas de almidón de trigo y agua sometidos a distintas condiciones de presión, temperatura y tiempo de tratamiento. Ellos encontraron que la temperatura para una completa gelatinización aumenta con el incremento de la concentración de almidón en la mezcla.

Capítulo III

METODOLOGÍA

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En esta sección se explicará el procedimiento seguido para desarrollar esta investigación. En primer lugar se describirá el registro de variables y caracterización de materias primas y subproductos y posteriormente las pruebas experimentales desarrolladas en el laboratorio y planta piloto.

III.1.- TOMA DE MUESTRAS

Para la determinación del número de muestras requeridas en este trabajo, se hizo uso de la ecuación (1) que de acuerdo a Anderson, Sweeney y Williams (2005) se emplea para determinar el tamaño necesario con una precisión deseada.

$$n = \left(\frac{k \cdot \sigma}{\Delta} \right)^2 \text{ Ec. 1}$$

Donde:

n= número de muestras

k= Coeficiente de distribución (1,96 para un 95% de confianza)

σ = desviación estándar

Δ = precisión deseada para la estimación del parámetro.

Todas las muestras estudiadas en general tuvieron una expansión con una desviación estándar de 0,6413 por registros diarios en SAP (Sistemas, Aplicaciones y Productos) que realiza el departamento de calidad y a su vez, se escogió arbitrariamente una precisión de estimación de 0,25 cm obteniéndose con esto un número de muestras igual a 25, las cuales fueron tomadas en días aleatorios durante el periodo de cuatro meses (marzo 2009 a julio 2009).

III.2.- REGISTRO DE VARIABLES DE PROCESO Y CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS INTERMEDIOS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN

El registro de variables ayudó a conocer tanto el proceso como las condiciones de operación estándar del mismo, para ello se contó con un formato de registro diario de las variables de proceso, acompañado de la caracterización de la materia entrando a proceso, productos intermedios y final del proceso de laminación.

En los textos siguientes el número entre paréntesis hace referencia a la correspondiente corriente de proceso de la figura 11.

III.2.1. Registro de variables de proceso

a) Temperatura: esta variable se obtuvo de lo reportado por la termocupla ubicada en las cocinas y por medio de un lector infrarrojo, Marca Raytek y Modelo Raynger ST6.

Las mediciones de dicho parámetro, se realizaron los siguientes puntos del proceso: a la entrada de acondicionamiento (5), a la salida de la cocina (7), en la superficie de los rollos laminadores, a la salida de la secadora (9) y a la salida de la enfriadora (10).

b) Flujo de agua: este parámetro se encontró por medio del registro del flujo, mostrado en el rotámetro en línea, usado para acondicionar (2).

c) Tiempo de residencia: se midió indirectamente, conociendo la dimensión física tanto de los temperbines como de las cocinas y midiendo el flujo que se maneja en el instante. La determinación del flujo es una operación de rutina del departamento de producción.

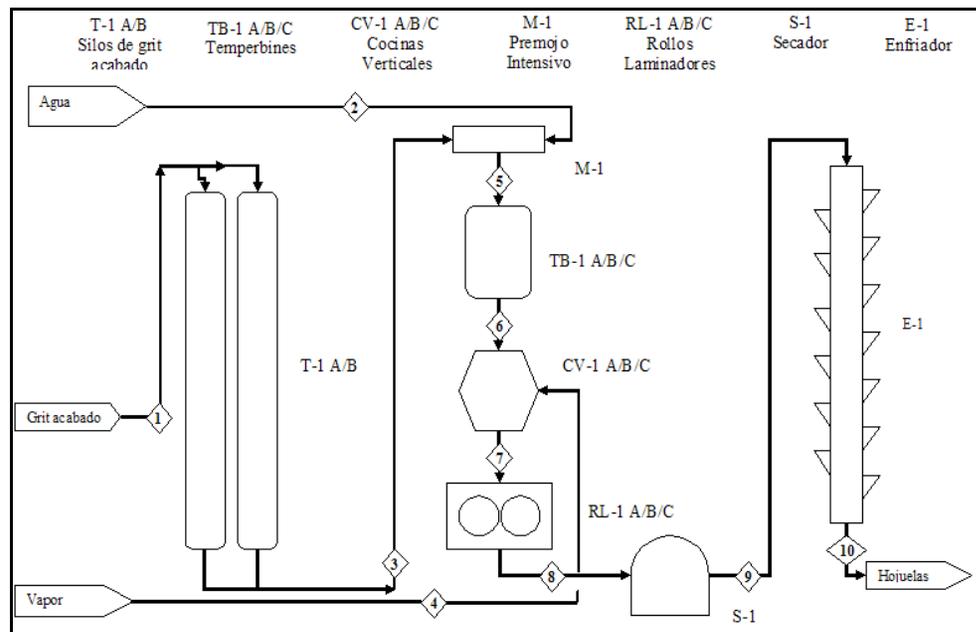


Figura 11.- Corrientes principales del proceso de laminación.

III.2.2 Caracterización de productos

a) Materia de entrada a proceso

Como materia prima se tiene el Grit acabado, proveniente de los silos donde se almacena luego del proceso de desgerminación. La muestra fue tomada justo a la descarga de los silos (3) y se le realizó los siguientes análisis:

a.1) Perfil granulométrico

A fin de obtener una distribución del tamaño de partículas, se sometieron 100 g de muestra por 10 min. a un agitador de tamiz de prueba Ro-Tap, Modelo RX-29, con tamices estándar de la serie Tyler, los cuales se indican a continuación en la tabla 5.

Tabla 5.-Tamices empleados en el análisis granulométrico.

Rango de apertura en (mm)	Malla US Tyler #
>8	5/16"
(8-6,7]	0,265"
(6,7-4,75]	4
(4,75-3,35]	6
(3,35-2,36]	8

a.2) Análisis de Humedad

La muestra de grit fue tomada evitando las pérdidas del contenido de humedad de la muestra antes del análisis, empleando para ello un recipiente sellado. Finalmente la muestra fue molida, haciendo uso de un molinillo, marca KNIFETEC y modelo 1095, y su humedad fue determinada por el método de estufa a 130 °C, de acuerdo a la Norma COVENIN 1553-80 y se dejaron toda la noche.

b) **Productos intermedios**

Como producto intermedio se tiene el Grit cocido, proveniente de las cocinas y medido en el rodillo estriado (7) que suministra la alimentación a los rollos laminadores, la hojuela a la salida del laminador (8) y la hojuela de la secadora (9). El análisis realizado a estos productos fue:

b.1) Análisis de humedad

Se realizó de manera semejante a la de grit, teniendo especial cuidado de la pérdida de humedad puesto que el contenido de humedad de las muestras: grit cocido y la hojuela a la salida del laminador, es alto y tiende a perderse rápidamente.

c) **Producto de laminación**

Como producto de la etapa de laminación se tiene la hojuela, la cual fue tomada en la parte más baja del enfriador y cabe destacar que en esta etapa la hojuela es muy estable. A estos productos se les realizó los siguientes análisis:

c.1) Análisis de expansión

Fue realizado por los analistas de la gerencia de calidad por el método del consistómetro de acuerdo a la norma COVENIN 2160.

c.2) Perfil amilográfico

En este análisis, la muestra fue reducida a un tamaño de partícula homogéneo, [180-250] μm , para lo cual se utilizó un molinillo a escala de laboratorio y el Ro-tap en conjunto con los tamices de la serie Tyler. Posteriormente con ayuda del Analizador Rápido de viscosidad se generaron el amilograma, empleando los perfiles de viscosidad; standard 1 y de viscosidad a 30° C que se indican en la tabla 6.

Tabla 6.-Perfiles de viscosidad: Standard 1 y viscosidad 30° (Crosbie y Ross, 2007)

	Estándar 1		Viscosidad a 30° C	
Proporción ($m_{\text{muestra}}:m_{\text{agua}}$)	4:25		8:25	
Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Agitación (rpm)
0	50	960	30	960
10	50	160		160
60	50	160		
262	95	160		
432	95	160		
660	50	160		
780	50	160		

Para la realización de dicho perfil, se tuvo que ajustar la proporción de masa de muestra y agua de acuerdo al contenido de humedad de la muestra, para esto se utilizó el calculador que posee el software que opera el equipo.

Cabe destacar que a este análisis también se sometieron: la materia entrando a proceso y los productos intermedios y final.

Es importante mencionar que a todos los datos obtenidos de los muestreos realizados, se les hizo un análisis descriptivo por medio del software SPSS 17.0 Inc., con el cual para cada variable se pudo obtener: diagrama de frecuencia, media y desviación estándar, los cuales serán expuestos en la sección de resultados.

III.3.- PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL LABORATORIO

III.3.1 Equipos y materiales

Para la realización de las pruebas experimentales, se utilizó endospermo de maíz blanco (*Zea mays L.*) y se llevaron a cabo empleando los siguientes equipos piloto:

- Mezclador: se empleó con el fin de mezclar el grit y el agua a la relación definida, labor desempeñada industrialmente por el pre-mojo intensivo. El equipo consiste en un cilindro dispuesto horizontalmente en unos soportes que permiten el giro, accionado manualmente; del mismo sobre su propio eje. En éste eje concéntrico contiene adheridas unas paletas que incrementan el contacto entre las partículas y el agua.
- Cocina de vapor: este equipo fue utilizado para suministrar vapor al grit previamente acondicionado por un tiempo estipulado.
- Laminador a pequeña escala: éste fue empleado para formar las hojuelas a partir del grit cocido de maíz.

Tanto la cocina de vapor y el laminador piloto fueron construidos para realizar este estudio y a su vez se muestran en el siguiente esquema (Fig. 12).

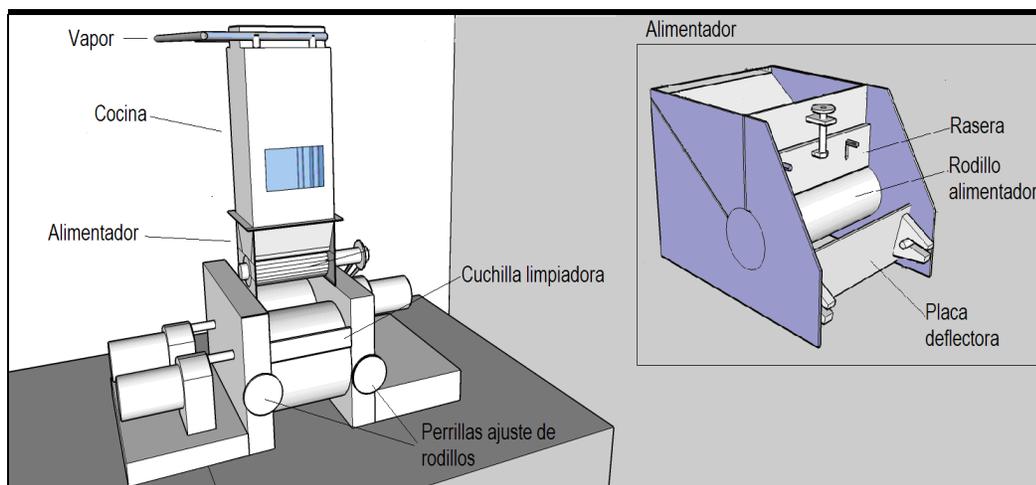


Figura 12.- Esquema del equipo empleado para las pruebas piloto

A su vez, se necesitó de los siguientes equipos ya existentes en el laboratorio:

- Estufa: Se empleó una estufa Marca (Binder) y Modelo (ED 53), la cual ayudó a retirarle la mitad del contenido de humedad a las hojuelas. Este proceso industrialmente es realizado por la secadora.
- Tamizador por vibración: Se usó un equipo Marca (Thomas Scientific) y Modelo (J-1B) y fue empleado para tamizar el grit proveniente de la planta.
- Balanza: Se usó un equipo Marca (Mettler Toledo) y Modelo (Spider) con capacidad de pesar hasta 100kg.
- Molino: Se utilizó un molino, Marca KNIFETEC y Modelo 1095; utilizado para reducir el tamaño de las hojuelas.
- Vernier: Se empleó un equipo Marca Caliper y Modelo Somet, de 150 x 0,05 mm.

III.3.2 **Obtención de patrón experimental**

Tomando como base los datos recopilados en la primera sección, se procedió a reproducir en el laboratorio una hojuela que presente características similares a las poseídas por la estándar producida en planta.

Para realizar este objetivo se siguió un esquema de trabajo tal como el que se observa en la figura 13, previamente se debe aclarar los siguientes términos:

Carga de preparación: Es una cantidad de grit, que ayuda a ajustar el tiempo de residencia y ayuda a estabilizar las condiciones de operación del equipo.

Marcador: Es una pequeña cantidad de grit entre (1-2) Kg. bastante diferenciable tanto de la carga de preparación como de la de prueba, que se emplea para identificar que ha salido toda la carga de preparación y que viene la carga de prueba.

Carga de prueba: Es el grit a procesar y consta de 20 Kg.

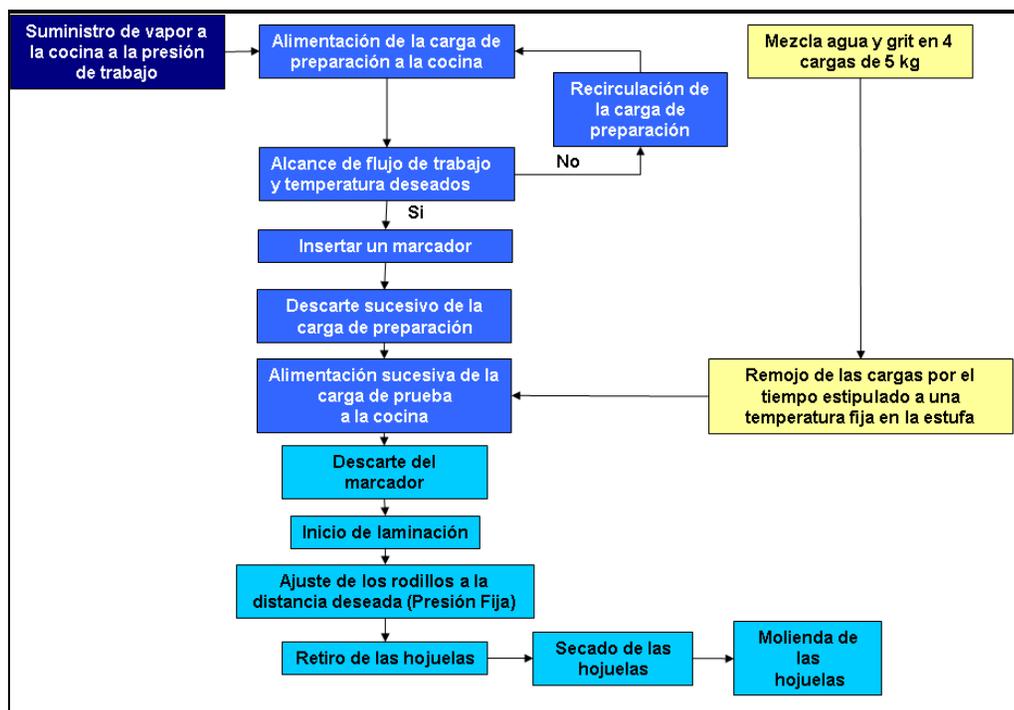


Figura 13.- Esquema empleado para la producción de hojuela en planta piloto.

Los equipos construidos, se ajustaron inicialmente a las condiciones de proceso que fueron determinadas previamente como las estándar a fin de realizar una comparación entre las características de las hojuelas producidas en el laboratorio y las producidas en la línea, posteriormente se realizaron los ajustes en los equipos, dentro de las posibilidades técnicas del equipo piloto y tomando en cuenta las diferencias entre los procesos, para finalmente obtener una hojuela análoga a la producida en planta.

El flujo de trabajo se ajustó haciendo una combinación entre la apertura de la rasera de alimentación y la velocidad de giro del rodillo dosificador, para lo cual se construyó una tabla de valores para cada relación y con esto se pudo tener los distintos flujos a emplear (ver apéndice 6).

Las velocidades de giro de los rodillos laminadores se fijaron realizando varias pruebas con distintos diferenciales de velocidad entre ellos, tomando en cuenta

la limitación técnica del equipo de la transmisión de velocidad del motor al rodillo móvil.

III.3.3 Diseño y comparación experimental

De acuerdo a Ferre Joan (2009) el diseño factorial completo 2^k es la estrategia experimental más adecuada para medir como influyen k factores en un proceso y la relación entre ellos. Por lo que, en este trabajo se usó dicha estrategia.

El diseño factorial empleado fue de dos niveles y tres factores (2^3), ya que el objetivo de este estudio es conocer el efecto de las variables de proceso: relación agua y grit (r), tiempo de residencia (t) y el tamaño del grit (T_p) sobre las características de la hojuela producida. Empleando las condiciones que se obtuvieron en el patrón experimental.

Inicialmente para la ejecución del diseño factorial, se procedió a seleccionar los valores con extremos distintos para cada variable (factor) dentro del dominio técnicamente posible y que incluyera los valores del patrón experimental, para lo cual se tomó un valor por encima (denotado por “+”) y uno por debajo (denotado por “-“) del valor patrón, empleando para esta sección dicha simbología. Con lo anterior, se elaboró una matriz experimental (tabla 7) que incluye todas las posibles combinaciones de valores de los factores lo que permitirá distinguir el efecto entre las variables.

Tabla 7.- Matriz empleada para el diseño factorial

	T_p	t	r
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

A cada una de las muestras obtenidas de las combinaciones del diseño factorial se le realizaron los siguientes análisis:

✓ Viscosidad bajo los perfiles de Viscosidad a 30° de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente.

✓ Medición de la expansión indirectamente, obtenido por medio de una gráfica de correlación que fue creada entre la viscosidad final desarrollada bajo el perfil de viscosidad a 30° C y la expansión para distintas marcas comerciales de harina precocida de maíz.

Luego de la caracterización de las muestras, se procedió a calcular los efectos de las mismas, ajustando cada una de ellas, a un modelo de regresión multivariante, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$y = b_0 + b_{T_p} T_p + b_t t + b_r r + b_{T_p \times t} T_p \cdot t + b_{t \times r} t \cdot r + b_{T_p \times r} T_p \cdot r + b_{T_p \times r \times t} T_p \cdot t \cdot r \quad \text{Ec. 2}$$

Como cada una de las variables de cada tratamiento presentaron un rango distinto entre ellas, se tuvo que normalizar los resultados obtenidos, a fin de comparar los distintos efectos entre sí, para tal fin, se utilizó la siguiente ecuación:

$$X_i = \frac{\varepsilon_i - \overline{\varepsilon_i}}{\frac{\text{rango}_i}{2}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde: X_i : Variable normalizada

ε_i : Variable a normalizar

$\overline{\varepsilon_i}$: Promedio de las variables a normalizar.

Finalmente mediante comparación se evaluaron los efectos producidos y se determinaron las variables que más afectaron las características fisicoquímicas de la hojuela final.

Capítulo IV

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados alcanzados en el estudio de las condiciones en la etapa de cocción para la producción de harina precocida de maíz son presentados en este capítulo, el cual abarca 3 puntos para un mejor entendimiento.

- ✓ Registro de variables de proceso
- ✓ Caracterización de productos intermedios del proceso de laminación
- ✓ Pruebas experimentales en el laboratorio

IV.1.- REGISTRO DE VARIABLES DE PROCESO

Las variables de proceso a registrar son: Temperatura, Flujo de agua y Tiempo de residencia. A continuación se explican los resultados obtenidos:

1. Temperatura

En la tabla 8, se muestran los valores de temperatura obtenidos en las distintas etapas del proceso descrito en la sección de la metodología y a su vez, en el apéndice se pueden observar los histogramas de todos los datos recogidos.

Tabla 8.- Perfil de temperatura en distintas etapas de la laminación.

Punto de Muestreo	Temperatura (°C)
Grit entrando a acondicionamiento	40 ± 1
Grit cocido	100 ±1
Hojuela en la salida de la secadora	70 ± 7
Hojuela salida de la enfriadora	36 ± 2

De dicha tabla, se destaca la desviación que muestra la temperatura a la salida de la secadora como de la enfriadora, ya que ambas tienen una gran dispersión.

La desviación de la temperatura de la secadora puede deberse a la entrada de aire más frío a la del ambiente debido a la apertura de la compuerta de la descarga por operadores u otros terceros antes de la medición de la muestra. La otra desviación de la temperatura de la enfriadora puede corresponderse de acuerdo al procedimiento de muestreo (ver apéndice), ya que se mide dicho valor en dos puntos de cada extremo del equipo, donde un extremo siempre está más caliente que el otro lo que probablemente se deba a que un extremo se encuentra en las adyacencias de un temperbin de la misma línea haciendo que disminuya el flujo de aire que atraviesa al sistema de enfriamiento y las temperaturas no sean iguales en ambos puntos.

2. Flujo de agua

El flujo de agua empleado para acondicionar las muestras en la planta es de (1269 ± 79) Kg/h, dicho valor se obtuvo de la distribución de frecuencias realizado a todas las muestras estudiadas, tal como se muestra en la figura 14.

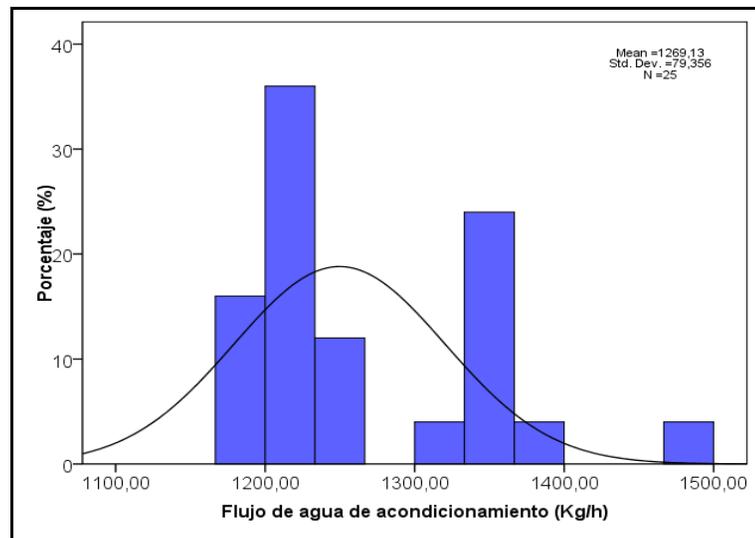


Figura 14.- Distribución de frecuencias para el flujo de acondicionamiento de agua.

En la figura 14, se observa una importante dispersión de los datos, así como también se destaca la presencia de dos picos uno entre 1180 y 1200 kg/h que agrupa 60 % de las medidas y otro comprendido entre 1300-1400 kg/h que representa el 35% de los datos, lo que parece dos medias distintas, lo cual se confirma al ver el registro secuencial de las mediciones (figura 15) donde se aprecia una tendencia hacia el aumento de flujo de agua tendiendo a estabilizarse en un nuevo valor, lo que significa claramente un cambio del flujo de agua operativamente.

Dicha variación se produjo por un aumento de producción de la línea donde se realizó el muestreo, en donde se encontraban sólo dos laminadores para el proceso y a partir de la muestra N° 13 se dio inicio al arranque de un tercer laminador. De igual forma se tuvo un solo valor de media que reflejaría el flujo empleado.

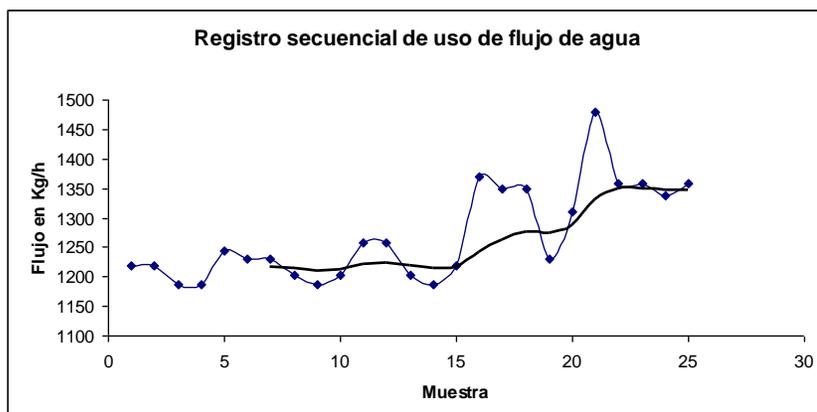


Figura 15.-Registro de secuencial del flujo de agua de acondicionamiento.

3. Tiempo de residencia

Del registro diario del flujo de hojuelas (flujo de proceso), se obtuvo como media general de los datos por laminador un flujo de: $(12,60 \pm 1,421)$ Kg/10s, tal como se observa en la figura 16. De donde, se aprecia además la variación de producción explicada en el punto anterior, lo cual ocasionó el incremento del uso de agua, ya que, se observan dos medias claramente distinguibles. Una se encuentra entre 10,6 y 12,5 Kg/10s representando el 55% de los datos y corresponde al funcionamiento de 3 laminadores. El restante de los datos se encuentra entre 13,8 y 14,5 Kg por cada 10 s y corresponde al empleo de 2 laminadores. De igual forma se obtuvo una sola media para el flujo de laminador.

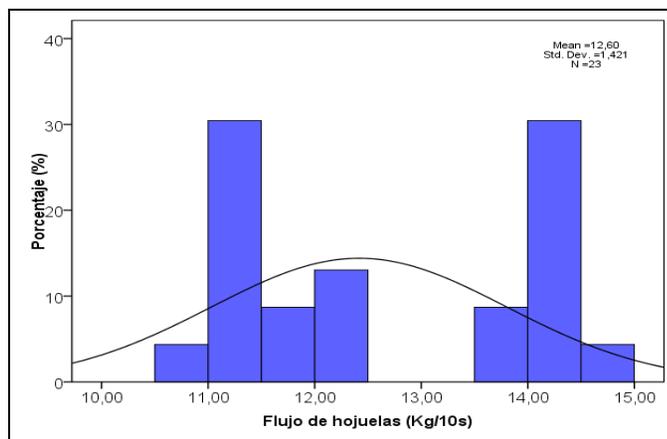


Figura 16.- Distribución de frecuencia flujo de proceso.

Para la obtención de los tiempos de residencia en las secciones estudiadas se calculó de manera indirecta, ver apéndice, conociendo la capacidad tanto de los temperbines como de las cocinas de la línea y tomando la media obtenida anteriormente para el flujo de proceso, los resultados alcanzados se muestran en la tabla 9.

Tabla 9.- Tiempos de residencia del proceso.

	Capacidad (Kg)	Tiempo residencia (min.)
Temperbin	15456 ± 295	205 ± 26
Cocina	2776 ± 97	37 ± 4

IV.2.- CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN

Los productos del proceso de laminación son: Grit entrando a proceso, productos intermedios y producto de laminación. Todos ellos, se analizan posteriormente:

1. Grit entrando a proceso

El grit procesado industrialmente presentó una distribución de tamaño de partículas tal como el que se muestra en la figura 17.

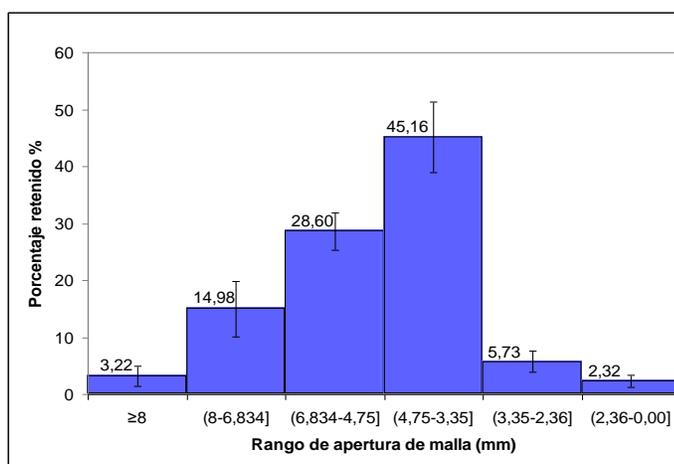


Figura 17.-Distribución de tamaño de partículas para el grit procesado industrialmente.

En la figura 17, se observa el amplio rango en que varían las partículas debido a la fractura que recibe el maíz en el proceso de desgerminación. Las partículas de diámetro promedio mayor a 8 mm es maíz prácticamente entero con presencia de concha y germen a diferencia de las partículas entre 6,834 y 3,35 mm que representan secciones del maíz desgerminado fracturadas. Igualmente se aprecia, que alrededor del 80 % de la masa total es retenida en el rango de 8-3,35 mm.

Las barras de error en la figura muestran las desviaciones que posee cada malla, las cuales pueden llegar hasta 10%, esto se debe a las fluctuaciones que presenta el tamaño de partícula y se aprecia en el registro secuencial en la figura 18, donde se representan las mallas más predominantes y también se muestran los cambios violentos que puede sufrir el tamaño de partículas en la desgerminación, donde se destacan las muestras 16 y 17, las cuales representan mediciones hechas el mismo día en distintos turnos de operación.

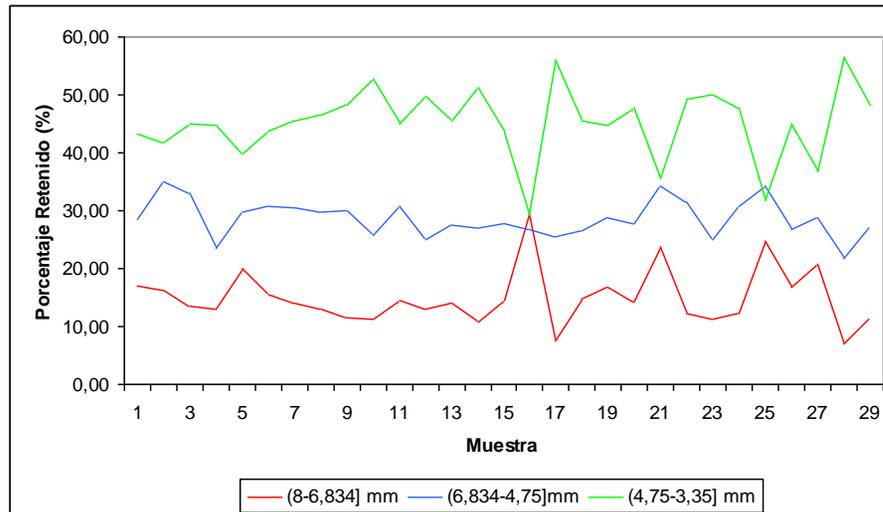


Figura 18.- Registro secuencial del tamaño de partículas por mallas.

2. Productos intermedios

El grit de maíz contiene un porcentaje de humedad en base húmeda de $12,24 \pm 0,437$ % y una actividad de agua correspondiente de $0,590 \pm 0,010$, esta condición es la adecuada conociendo que proviene de un silo de almacenamiento. Dicho valor de humedad fue obtenido de un histograma que contiene la media y desviación promedio de todas las muestras analizadas, la gráfica se puede observar en el apéndice 2 (Figura 26).

En la tabla 10, se muestran las humedades para los productos en distintas etapas del proceso, descritas cada una en la metodología.

Tabla 10.- Humedades a distintas etapas del proceso de laminación.

Muestra	% Humedad (En base húmeda)
Grit entrando a proceso	$12,24 \pm 0,437$
Grit a la descarga de las cocinas	$21,66 \pm 0,77$
Hojuela a la salida de Laminador	$19,41 \pm 1,00$
Hojuela a la salida de la Secadora	$11,51 \pm 0,99$
Hojuela a la salida de la Enfriadora	$11,19 \pm 0,61$

La tabla 10, refleja lo esperado para el proceso, alta humedad para el grit que es humedecido y posteriormente en contacto directo con vapor, por espacio de 242 min., también una pérdida de humedad por el efecto de laminación y posteriormente un súbito retiro de humedad hecho por la secadora que retira cerca de la mitad del contenido de agua y se mantiene prácticamente constante durante y después de la operación de enfriamiento

3. Producto de laminación

A continuación se muestra el diagrama de frecuencia para la expansión de las hojuelas (Fig. 19), enfriadas y premolidas en planta, principal variable controlada en

el proceso de laminación. De la figura, se puede decir que la expansión posee un valor medio de $(5,93 \pm 0,492)$ cm.

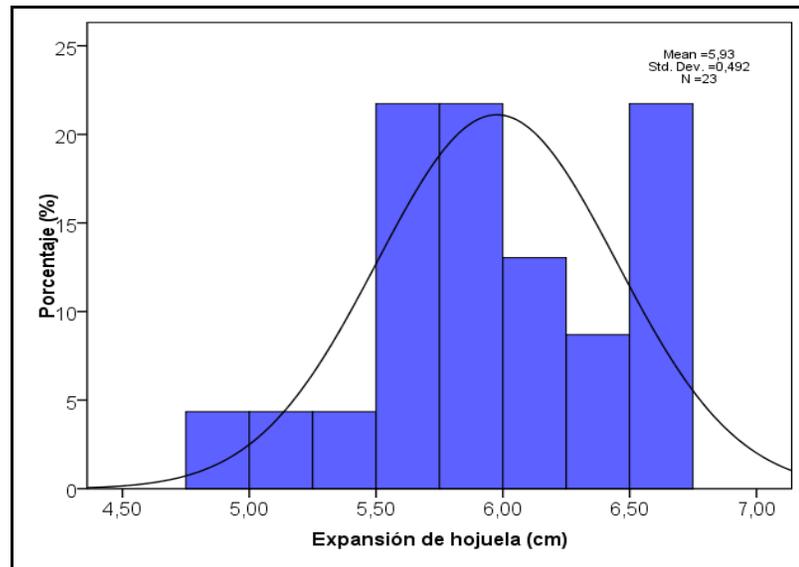


Figura 19.- Diagrama de frecuencia para la expansión de las hojuelas.

En la figura 20, se muestra el perfil Amilográfico Estándar 1, para las muestras en distintas etapas del proceso. A su vez, se visualiza el cambio que origina el efecto de la laminación haciendo que la viscosidad tenga un aumento importante en los primeros 2 minutos a 50 °C (disminución de la temperatura de empastamiento) a diferencia del grit acabado que requiere de más tiempo y temperatura, lo cual se genera por el rompimiento de la estructura que une los gránulos de almidón a causa de la fuerza mecánica impuesta por los rodillos laminadores lo que hace que los gránulos queden más expuestos y al ponerse en contacto con agua a bajas temperaturas se hinchan con mayor facilidad, en donde se puede decir que una parte de los gránulos se encuentran pregelatinizados, el pico de viscosidad presenta una leve disminución lo que indica un desplazamiento del equilibrio hacia la presencia de más ruptura y alineación de las cadenas poliméricas y un menor hinchamiento de los gránulos, comparado con el comportamiento que ofrece el almidón del grit sin tratamiento.

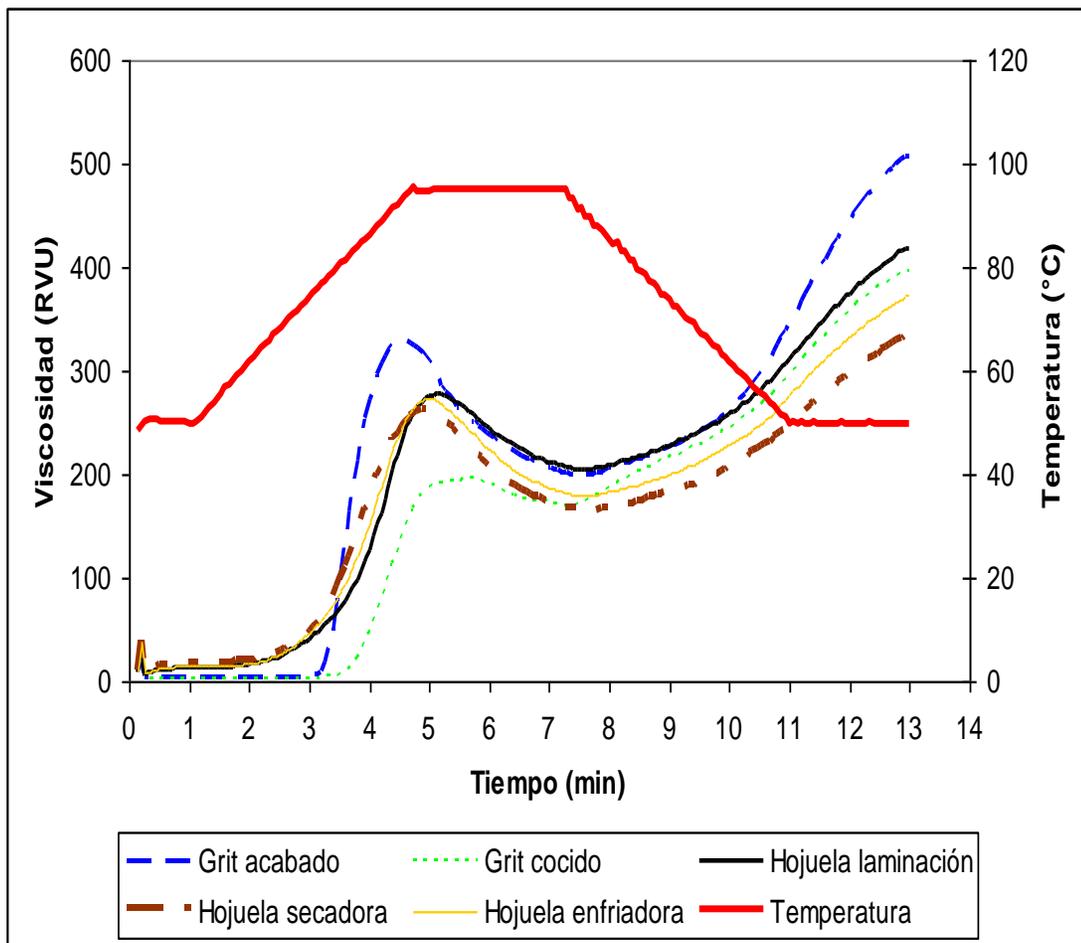


Figura 20.-Perfil amilográfico del producto en distintas etapas del proceso.

Es de notar y destacar el papel que tienen los rodillos laminadores en el proceso de absorción de agua por parte de la harina precocida de maíz, por la capacidad que ésta adquiere de absorber agua en frío y a su vez de desarrollar viscosidad (expansión) lo cual se aprecia en dicha figura.

Adicionalmente en la figura 21, se muestra como la viscosidad RVA a 30° C aumenta debido a la etapa del secado y en la tabla 11, se observa los resultados del análisis, donde se refleja el beneficio e importancia que tiene el secado en el comportamiento del producto.

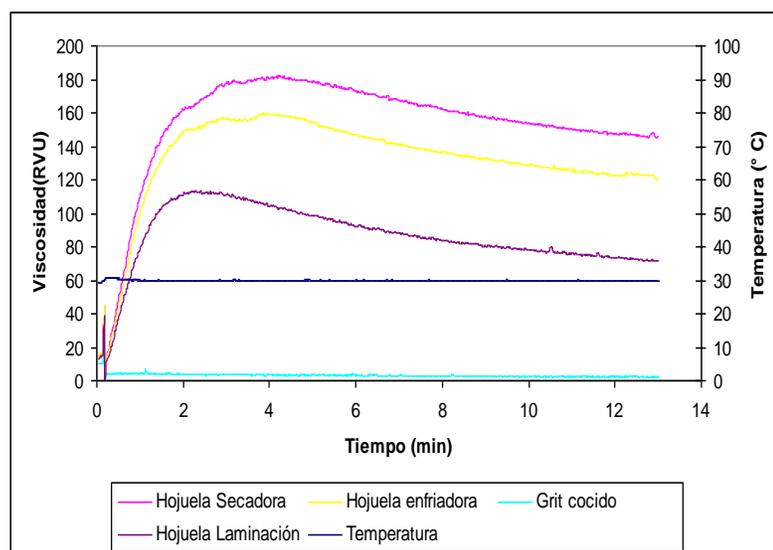


Figura 21.-Perfil de Viscosidad RVA a 30° C para las distintas hojuelas y grit.

Tabla 11.- Resultados analíticos para la viscosidad a 30° en distintas etapas del proceso

Muestra	Velocidad de Absorción H ₂ O (RVU/min.)	Viscosidad Máxima (RVU)	Viscosidad Final (RVU)	Caída (RVU)
Grit cocido	0,36	7,17	2,42	4,75
Hojuela laminación	88,81	113,67	72	41,67
Hojuela secadora	125	182,17	145,75	36,42
Hojuela enfriadora	113,57	159,83	120,25	39,58

IV.3.- PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL LABORATORIO

Los equipos diseñados y construidos para las pruebas piloto, se ajustaron inicialmente a las condiciones de proceso encontradas en el punto IV.1 de éste capítulo.

Ajuste de los equipos

- ✓ Obtención de la relación de agua añadida al grit

A fin de obtener la cantidad de agua añadida al grit en el proceso industrial, puesto que en planta no se dispone de un contador de la masa de grit que se mezcla

con el agua, fue necesario estimarla, realizando un balance de masa y haciendo uso de las condiciones de proceso y características del producto obtenidas en las secciones previas (ver apéndice 8), para lo cual se obtuvo un valor de relación de masa igual a 0,1. El cálculo empleado se realizó mediante la ecuación 4.

$$r = \frac{m_a}{m_g} = 0,10 \text{ Ec. (4)}$$

Donde:

r = relación del agua con el grit

m_a = masa de agua

m_g = masa de grit

✓ **Obtención del tiempo de residencia a emplear**

A fin de emplear el mismo tiempo de residencia del proceso industrial en el proceso piloto, se obtuvo de manera indirecta con el flujo a manejar, ya que teniendo el tiempo y conociendo la dimensión del equipo se pudo obtener dicho flujo (el cálculo de esta variable se realiza de la misma forma que el tiempo de residencia del proceso), el cual se reporta en la tabla 12.

Tabla 12.- Comparación de equipo de proceso industrial y piloto

Variables	Proceso industrial	Proceso piloto
Flujo de trabajo (kg/s)	1,26	0,011
Presión del vapor (psi)	6,0±0,1	0,5±0,1

En cuanto a la presión de vapor suministrada se usaron 0,5 psi, ya que es la mínima presión confiable que ofrece el manómetro dispuesto la tubería de alimentación al equipo piloto. La presión de los rodillos fue medida indirectamente a través del espesor de la hojuela. Esta se mantuvo fija empleando la misma separación entre los rodillos a lo largo de las pruebas obteniendo hojuelas de un mismo espesor (0,85 mm).

Los demás parámetros se fijaron de acuerdo a lo mostrado en la tabla 13.

Tabla 13.- Valores de parámetros de ajuste de proceso piloto.

Parámetro	Valor
Temperatura de acondicionamiento en estufa(°C)	40
Velocidad rodillo alimentador (rpm)	6,5
Apertura de la rasera (mm)	6
Velocidad de rodillos rpm/rpm (móvil/fijo)	78/160
Temperatura de secado (°C)	30
Tiempo de acondicionamiento (min.)	205

✓ **Modelaje de la expansión para distintas harinas precocidas de maíz**

Para verificar un buen ajuste de los parámetros del proceso piloto, se realizó una prueba que consistió en medir la expansión indirectamente, por medio de la gráfica de correlación creada entre la viscosidad final desarrollada bajo el perfil de viscosidad RVA a 30° C y la expansión, para dos hojuelas distintas de la planta y para una hojuela existente en el mercado (ver apéndice 5).

Las distintas hojuelas mostraron un perfil de viscosidad como el que se muestra en la Figura 22. De dicha figura, se observa que las hojuelas del proceso piloto desarrollan menos viscosidad (máxima y final) 61,71 y 44,25 RVU respectivamente, comparado con los valores mínimos esperados de una hojuela de planta para la viscosidad máxima y final 113,67 y 72 RVU. De igual manera, las hojuelas piloto mostraron una mayor expansión con un valor igual a 10 cm distante de lo que la norma Covenin 2135 exige (8,5 cm) para harina precocida de maíz, a pesar de estar alejado de lo esperado se procedió a compararla contra la expansión de una harina precocida de maíz de otra marca comercial existente en el mercado y se obtuvo que dicho valor dista alrededor de 15 RVU.

La diferencia de las hojuelas piloto hacia lo exigido por la norma COVENIN 2135 puede deberse a la baja presión de los rodillos del laminador piloto lo cual pudiese ser compensado incrementando la velocidad de los mismos para imprimir más fuerza a la partícula pero el rodillo fijo se encuentra a su mayor velocidad y el rodillo móvil por construcción del equipo se ve limitado a alrededor de la mitad de su máxima velocidad o la diferencia puede deberse a la condición secado a una temperatura muy baja 30° C aplicados en el proceso piloto y al tiempo de reposo que tuvieron las hojuelas producidas antes de ponerlas a secar.

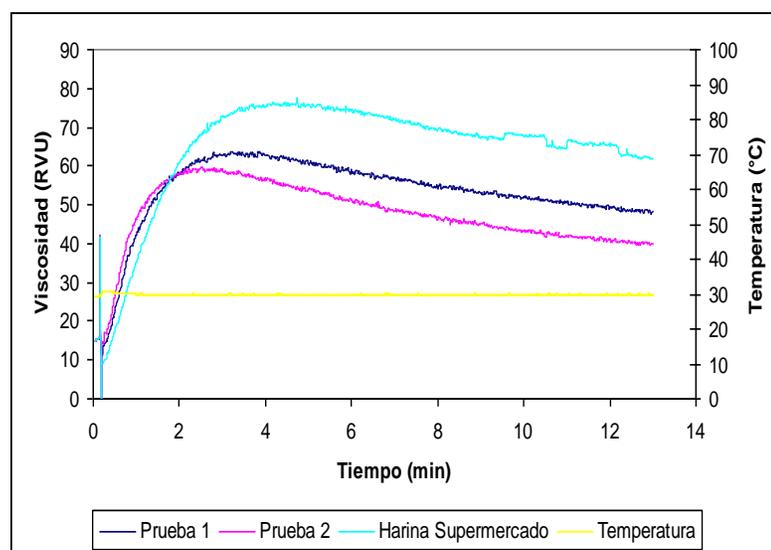


Figura 22.-Viscosidad a 30° para las hojuelas producidas a escala piloto.

Adicionalmente se muestra en la tabla 14, los valores de velocidad de adsorción de agua, viscosidad máxima y final y la caída de las viscosidades para cada prueba

Tabla 14.- Resultados analíticos de la viscosidad a 30°.

Muestra	Velocidad de Absorción H ₂ O (RVU/min.)	Viscosidad Máxima (RVU)	Viscosidad Final (RVU)	Caída (RVU)
Hojuela prueba 1	38,69	63,75	48,33	15,42
Hojuelas prueba 2	42,38	59,67	40,17	19,5
Harina de mercado	33,81	75,75	62,08	13,67

✓ Selección de los valores experimentales

En la tabla 15, se muestran los distintos niveles seleccionados para las variables del proceso piloto.

Tabla 15.-Valores experimentales seleccionados para las variables del proceso piloto.

Factores	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
T _p : Tamaño de partículas	Grueso	Fino
t: Tiempo de retención cocina(min.)	26,6	36,4
r: Relación agua/grit	0,073	0,158

El tiempo de retención en la cocina no pudo aumentarse más ya que ese es el mínimo flujo que puede operar el equipo sin que se presente una obstrucción de los granos por estar el rodillo a la velocidad más baja 6,5 rpm con la rasera (Figura 12) a una apertura mínima ya que al bajarla aún más los granos más grandes al no poder salir por el espacio se quedan retenidos en la misma.

El tiempo de acondicionamiento del proceso piloto en estufa mantuvo la misma relación con respecto al tiempo de cocina piloto que la relación de tiempo en temperbines y cocinas del proceso industrial, esto a fin de simular la continuidad de estas dos unidades de proceso.

El tiempo de retención en la cocina no pudo reducirse puesto que flujos mayores generan una acumulación de material sobre los rodillos laminadores ya que la entrada era tan rápida que no le daba oportunidad a los rodillos de laminarlo.

En cuanto el tamaño de partículas seleccionado como grueso y fino se observan en la figura 23. Se aprecia, el rango de apertura de malla para cada una de las distinciones mencionadas. A su vez, se tiene que los perfiles mostrados se

elaboraron sabiendo que a nivel industrial en la desgerminación no se obtiene partículas de un solo tamaño, ya que se necesitarían excesivas cantidades de grit para lograrlo.

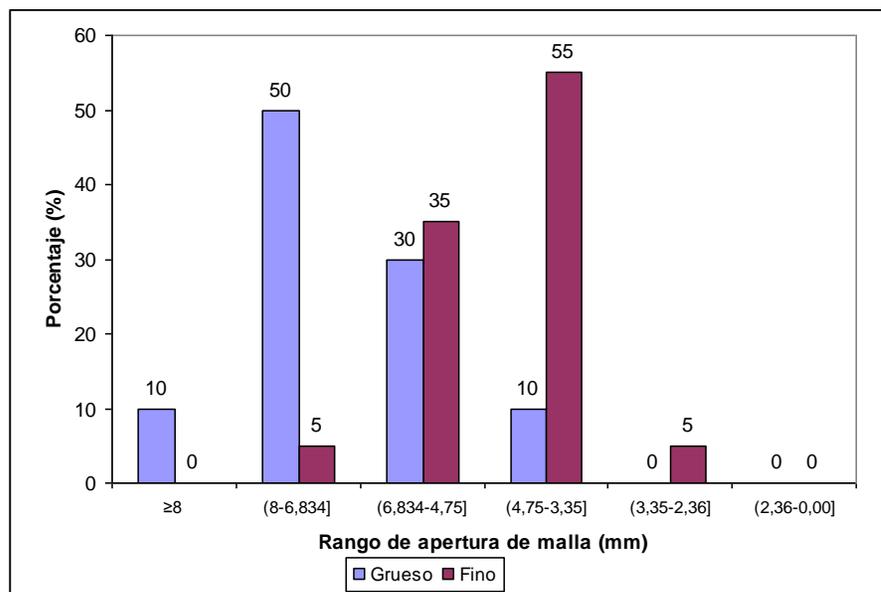


Figura 23.-Perfiles de tamaño de partículas empleados en pruebas pilotos

Para la relación de agua a grit empleado, los valores seleccionados se encuentran a dos extremos distintos (18% y 24%) respectivamente, éstos valores de humedades para el material a la temperatura de acondicionamiento en los temperbines (40 ± 1) °C se encuentran ubicados en extremos distintos de la curva de transición vítrea como se muestra en la figura 6 en la sección marco teórico, esto para ver el efecto de dos materiales en estados distintos durante el acondicionamiento sobre la harina experimental.

Resultados y comparaciones experimentales

Los distintos valores de las variables con la cual se realizaron los distintos tratamientos en el equipo piloto se muestran a continuación:

Tabla 16.-Tratamientos experimentales.

Experimento	Tratamientos		
	Tamaño de partículas	Tiempo (min.)	Relación agua/grit
1	Grueso	26,6	0,073
2	Fino	26,6	0,073
3	Grueso	36,4	0,073
4	Fino	36,4	0,073
5	Grueso	26,6	0,158
6	Fino	26,6	0,158
7	Grueso	36,4	0,158
8	Fino	36,4	0,158

En primer lugar en la tabla 17, se muestran los resultados obtenidos en las experiencias para la viscosidad RVA a 30° C de las hojuelas obtenidas a nivel piloto, ya que de este análisis la viscosidad final tiene correlación conocida e inversamente proporcional con la expansión (Ver apéndice 5).

Tabla 17 Resultados analíticos para la Viscosidad RVA a 30° C en pruebas experimentales

Número de experimento	Viscosidad RVA a 30° C			
	Velocidad de Absorción H2O (RVU/min.)	Viscosidad Máxima (RVU)	Viscosidad Final (RVU)	Caída (RVU)
1	2,98	13,5	10,08	3,42
2	49,29	61,17	37,5	23,67
3	28,69	38,17	25,42	12,75
4	59,76	85,92	54,92	31
5	50	72,08	47,83	24,25
6	59,64	84,83	56,42	28,42
7	46,31	82,08	61,5	20,58
8	68,69	93,5	64,42	29,08

Con la ecuación 2, de la metodología, se pudo obtener los coeficientes para el modelo de regresión multivariante de la viscosidad final a 30 °C, el cálculo se encuentra en el Apéndice 4. Los coeficientes encontrados se muestran a continuación en la tabla 18.

Tabla 18.- Coeficientes para el modelo de regresión multivariante de la viscosidad final a 30 ° C.

Coeficiente central	b_o	44,76
Coeficiente de Tamaño de partícula	b_{Tp}	8,55
Coeficiente de tiempo de residencia	b_t	6,80
Coeficiente de relación agua-grit	b_r	12,78
Coeficiente Tamaño de partícula y tiempo	$B_{Tp\ xt}$	-0,45
Coeficiente de tiempo y relación agua-grit	b_{txr}	-1,39
Coeficiente de tamaño de partícula y relacion agua-grit	$b_{Tp\ xr}$	-5,68
Coeficiente de tamaño de partícula, tiempo, agua y grit	$B_{Tx\ txr}$	-0,97

De la tabla anterior, se aprecia que el coeficiente central b_o posee un valor de 44,76 RVU, éste corresponde al valor medio que tiene el dominio del experimento ya que al ver las variables codificadas éstas varían de -1 a 1 (Ver apéndice 4) por lo que el valor cero corresponde al centro del dominio así que al asignarles a las variables su valor medio se anulan todos los términos de la ecuación 2 y se obtiene el valor del coeficiente b_o dicho valor concuerda con lo obtenido en las pruebas de ajuste realizadas previamente donde se empleó un tamaño de partícula en un valor medio a los utilizados en las pruebas experimentales, de igual manera la relación agua-grit se trabajó en un valor intermedio a los experimentales.

Efectos principales

Los efectos de las tres variables individuales T_p , t y r sobre la viscosidad final a 30° C se distinguen al comparar los coeficientes correspondientes a cada variable b_{Tp} , b_t y b_r para los cuales de acuerdo a la tabla 18, si las variables adquieren un valor

codificado de +1 generan un aumento de la viscosidad final a 30° C (disminución de la expansión) sin embargo el que posee un efecto mayor es la relación de agua a grit $b_r = 12,78$. Al disminuir el Tamaño de partícula se incrementa la viscosidad final ($b_{TP} = 8,55$) sin embargo en menor grado que el incremento de agua. De igual manera se incrementa la viscosidad final para el incremento en el tiempo de residencia ($b_t = 6,80$) pero tiene menor influencia entre las tres variables.

Efectos de interacciones de dos factores

Como se aprecia en la tabla 18, el coeficiente de interacción entre la relación de agua y grit y el tamaño de partícula es el mayor de las interacciones, para ver si existe interacción de acuerdo a Ferre Joan (2009) el efecto de un factor ha de ser diferente para distintos valores de los otros factores. Así se procedió a observar los resultados para la viscosidad final a 30 ° C de manera que representen los vértices de un cubo como se muestra en la figura 24.

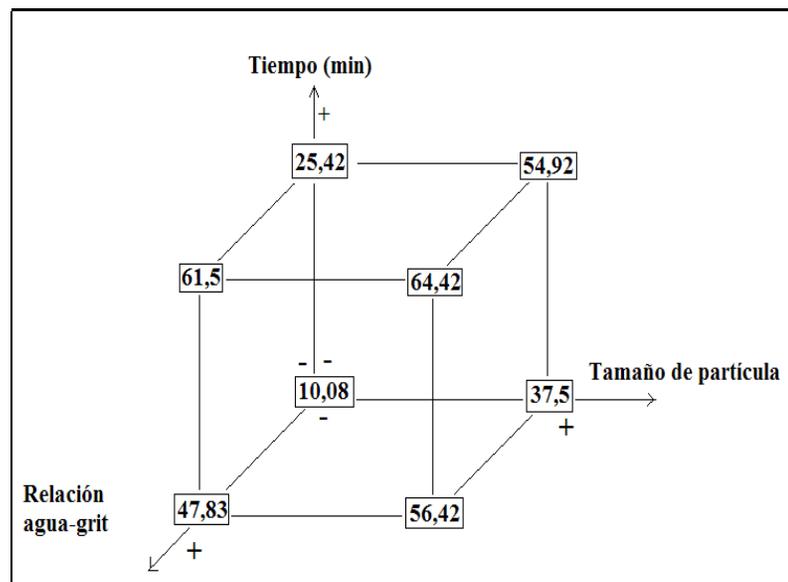


Figura 24 Representación tridimensional de los valores de viscosidad final a 30 °C

Si nos ubicamos en distintos tamaños de partículas (caras izquierda y derecha del cubo) para cualquier tiempo e incrementamos la relación agua-grit obtenemos un

efecto mayor en promedio en los valores de viscosidad final a 30° para el tamaño de partículas grueso (incremento promedio de 36,9 RVU) que para un tamaño de partícula fino (incremento promedio de 14,21 RVU) lo que indica que el cambiar la relación de agua- grit tiene un efecto distinto dependiendo del tamaño de partícula que se utilice. Esto se refleja en el modelo de regresión en un alto valor para el coeficiente de interacción entre el tamaño de partícula y la relación agua grit ($b_{T_{pxr}} = -5,68$) el signo negativo se explica puesto que en el modelo al tamaño de partícula grueso le corresponde el valor codificado de -1 y al fino +1.

Como el efecto entre la relación de agua grit depende del tamaño de partícula examinemos un posible efecto del tamaño de partícula que dependa de la relación de agua-grit. Nuevamente al ubicarnos en la figura se ve que para cualquier tiempo a una relación de agua-grit baja (cara posterior) el tamaño de partícula fino posee valores de viscosidad mayores que el grueso, y el mismo efecto es visto a cualquier tiempo a una relación de agua-grit alta (cara delantera), el tamaño de partícula fino genera viscosidades mayores que las del grueso e inclusive la mayor viscosidad final a 30° C se obtuvo con dicho tamaño de partícula, por lo que hay dependencia del efecto del tamaño de partícula con la relación agua-grit.

Las restantes interacciones son despreciables por lo bajo de sus coeficientes, de igual manera para el efecto de los tres factores es poco significativo.

El efecto de la relación de agua a grit sobre el aumento de la viscosidad muestra ser de mayor impacto sobre la viscosidad final a 30° C lo cual puede deberse a que mayor cantidad de agua penetra más hacia el interior del grano permitiendo que se ablande en su totalidad, lo cual concuerda con el estado en que ingresaron los materiales a las cocinas, uno plástico (%H= 18, T= 40 °C) y otro en estado vítreo (% H= 24, T= 40 ° C); de acuerdo a lo mostrado por la curva transición de fases Figura 6 del marco teórico para el almidón de maíz, y que de acuerdo a Riaz (2000) uno de los beneficios del preacondicionamiento es alterar la funcionalidad del producto, en el

caso de la harina precocida de maíz se manifiesta como una alteración de la viscosidad RVA a 30° C. Adicionalmente el que el efecto del aumento de relación de agua a grit sea mayor para partículas más grandes que para las pequeñas obedecería en principio al hecho que las partículas más grandes requieren de mayor cantidad de agua para penetrar hasta el centro del grano a diferencia de las partículas más finas con mayor superficie de contacto y donde la distancia sería más corta además todo esto se le puede agregar que el perfil de partículas grueso contiene gran cantidad de granos prácticamente entero con algún porcentaje de concha y germen que no son totalmente retirados en el proceso de desgerminación. La primera actúa como barrera protectora y la segunda como absorbente del agua.

A diferencia de que la variable tiempo de residencia el modelo de regresión lo arroja como la tercera de relevancia, cabe destacar que los dominios de las experiencias anteriormente explicadas no incluyen un tiempo de residencia aun menor donde el tiempo probablemente juegue un papel más destacado debido al tiempo (equilibrio) que le tome al agua penetrar hasta el centro de la partícula.

Capítulo V

CONCLUSIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- Las variables de constante manipulación por parte de los operadores de planta son el flujo de los laminadores y el flujo de agua.
- La distribución de tamaño de partículas para el material entrando a proceso de acuerdo al registro secuencial obtenido posee grandes fluctuaciones por lo que comprende una perturbación del proceso.
- El daño mecánico ejercido por el laminador sobre el endospermo de maíz es el que genera el carácter de absorción de agua de la harina precocida.
- El proceso de secado juega un papel importante incrementando el desarrollo de viscosidad final 30° C (reduce la expansión).
- El proceso piloto posee limitaciones por construcción, para reproducir el comportamiento que exhiben las hojuelas de planta. No obstante el comportamiento de las hojuelas obtenidas en el proceso piloto no dista mucho de lo exigido por la norma vigente para la harina precocida de maíz y su expansión.
- Dentro de las variables bajo estudio y el alcance del modelo de regresión multivariante obtenido en las pruebas piloto las variables de Tiempo de residencia (Aumento), relación agua-grit (aumento) y el tamaño de partículas (disminuye) tienden a reducir la expansión.
- Dentro de las variables bajo estudio y el alcance del modelo de regresión multivariante obtenido en las pruebas piloto, la variable que tiene mayor

efecto sobre la expansión es la relación de agua a grit. Sin embargo la magnitud de su impacto depende del tamaño de partícula empleado siendo mayor para un perfil grueso.

Capítulo VI

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Realizar las modificaciones técnicas del equipo piloto que permitan:
 - 1) Incrementar el daño mecánico ejercido por los rodillos laminadores.
 - 2) Ampliar el rango de flujo de trabajo reduciendo aún más el límite inferior actual.
 - 3) Descargar las hojuelas de manera inmediata a un equipo de secado.
- Mejorar las condiciones de secado para las hojuelas producidas en el equipo piloto, incrementando la temperatura de secado de 30 ° C a 70° C, que corresponde al valor real de planta.
- Realizar estudios con más niveles para las variables empleadas.
- Realizar estudios del efecto de los distintos estados (vítreo, plástico y fundido) para distintas condiciones de proceso y para ello adaptar la superficie de los rodillos laminadores pilotos a fin de registrar la temperatura correspondiente de manera segura con el medidor infrarrojo.
- Incluir en el modelo como variable el flujo de vapor, debido a que incrementos de este flujo ocasionarían una penetración más rápida del agua al interior del grano.
- Realización de sesiones con operadores de planta para complementar el modelo e implantar distintas acciones de operación en el proceso que ayuden una respuesta más eficaz ante las eventuales perturbaciones, condiciones de trabajo, etc.

Capítulo VII

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

Alimentos Polar. (2008). Instrucción: Proceso de laminación. 1ra Versión. Turmero.

Anderson David, Sweeney Dennis y Williams Thomas (2005). Estadística para administración y economía [Libro en línea]. México: Thomson. Disponible: <http://books.google.co.ve> [Consulta: 2009, febrero 12]

Atwell, W. y Thomas, D. (1999). Starches: Practical guide for the food industry. Eagan press. Minnesota, USA.

Badui, S. (2006). Química de los alimentos, 4 ed. México. Pearson. 84-85 p

Baks, T. y colaboradores (2008). Effect of pressure and temperature on the gelatinization of starch at various starch concentrations. Biomacromolecules 2008, 9;296-304.

Be Miller, J y Whistler, R (2009) Starch Chemistry and technology, 3ra ed. USA. Elsevier. 900 p.

Bhattacharyya, P y otros (2007). Effects of thermal treatments and germination on physico-chemical properties of corn flour. African Journal of Biotechnology, 6 (8); 994-999.

Bourne M (2002). Food texture and viscosity: Concept and measurement 2da ed. USA. Elsevier. 446 p.

Carpio, O (1990). Evaluación Operativa del diseño: Secadora Modelo Tubular Sección 2, Planta 2 A. REMAVENCA. Turmero.

COVENIN (1987) Maíz para uso Industrial.1935:1987.

COVENIN. (1996) .Harina de maíz precocida.3ra Revisión. 2135:1996.

Crosbie, G y Ross, A. (2007). The RVA Handbook. Minnessota,USA: AACC International.p 75-76.

Eliasson, A (2004). Starch in food: Structure, function an applications. CRC, Washington, USA 597 p.

Fast R. y Caldwell E. (2000). Breakfast Cereals: and How they are Made. 2ed. AACC. Minesota. USA. p 523.

Ferré, J (2009). El diseño factorial completo 2^k . [Documento en línea] Disponible: <http://www.quimica.urv.es/quimio> [Consulta: 2009,agosto 20].

Hay, M (2002). The extent of gelatinisation and change to the Microstructure of Starch as a result of extrusion processing. Trabajo no publicado, The university of queensland. Australia.

Kaletunç, G y Breslauer, K (2003). Characterization of cereals and flours: properties, analysis y applications. Marcel Dekker Inc. USA. 523 p.

Lorenz,K y Kulp Karel (1991). Handbook of cereal science and technology. Marcel Dekker, Inc. New York, USA. Pág. 11,12, 56.

- Lund, D Y Heldman D, (2007). Handbook of Food Engineering, 2 ed. Taylor & Francis Group, Boca Ratón FL.
- Perez, A y colaboradores. (2008) Extrusion cooking of a maize/soybean mixture: Factors affecting expanded product characteristics and flour dispersion viscosity. *Journal of Food Engineering*, 87(3); 333-334.
- Perry R, Green D, Maloney J (1998). Perry Manual del Ingeniero químico: Desecación de sólidos y sistemas gas-sólido, 6^{ta} ed. México: Mc Graw- Hill.
- Ponte-García N y colaboradores (2008). Study of viscoelastic properties of wheat kernels using compression load method. *Cereal Chemistry*. 85(5): 667-672.
- Ramirez, Wong y colaboradores. (1994) Cooking Time, Grinding, and moisture content effect on fresh corn masa texture. *Cereal Chemistry*. 71 (4):337-343.
- Riaz, M. (2000). Extruders in food applications, Taylor & Francis Group, Boca Ratón FL. Pag 115-126.
- Sandoval, E y (2006). Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. 19:17-36.
- Speetjens, J (2002). Feed process: Steam flaked grain. *World Grain* [Revista en línea] Disponible:http://www.geelanconterflow.com/documents/steam_flaked_grian.pdf [Consulta: 2009, mayo 1].
- Strahm, B (1998). Fundamentals of polymer science as and applied extrusion tool. *Cereal Foods World*. 43(8); 621-625.

Watson, S y Ramstad P. (1987).Corn: Chemistry and Technology. AACC, Minesota,
Usa. 600 p.

Capítulo VIII

APÉNDICES

CAPÍTULO VIII

APÉNDICES

1.- Equipo piloto



Figura 25.- Equipo empleado para las pruebas piloto.

2.- Diagramas de frecuencia de las variable de proceso y de los productos intermedios

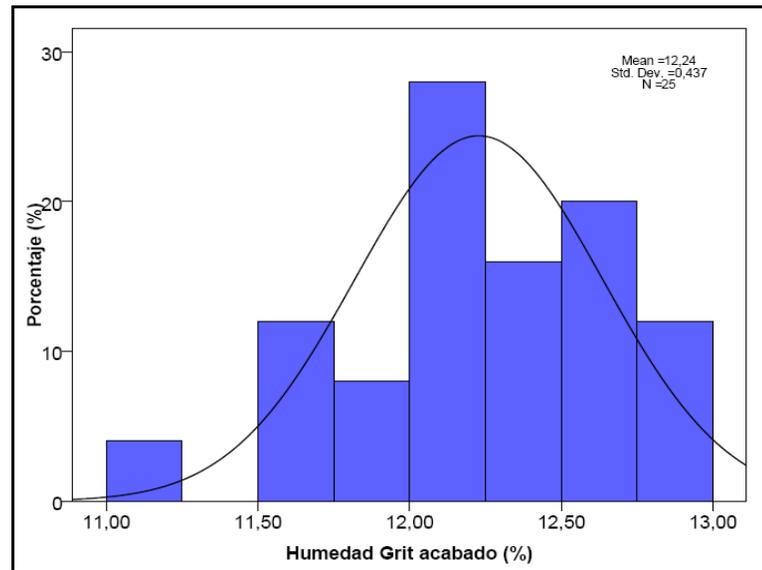


Figura 26.- Diagrama de frecuencia del grit entrando a acondicionamiento.

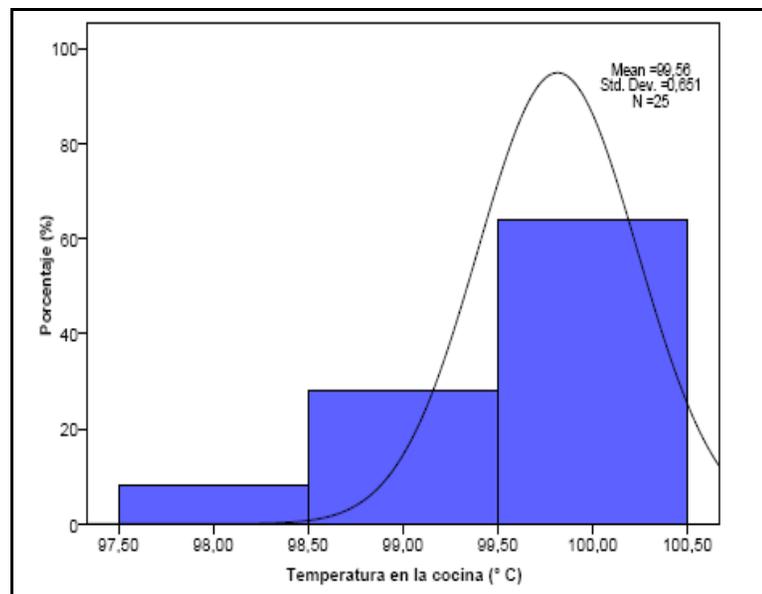


Figura 27.- Diagrama de frecuencia del grit cocido.

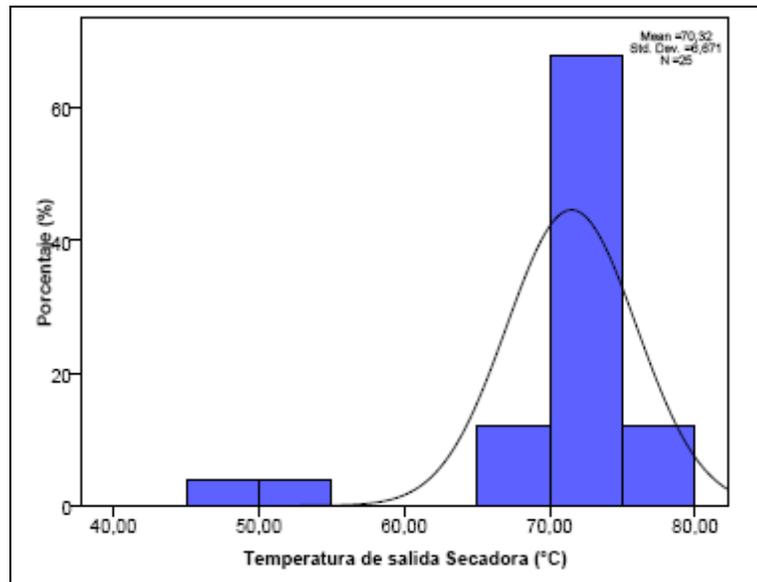


Figura 28.- Diagrama de frecuencia de la hojuela a la salida de la secadora.

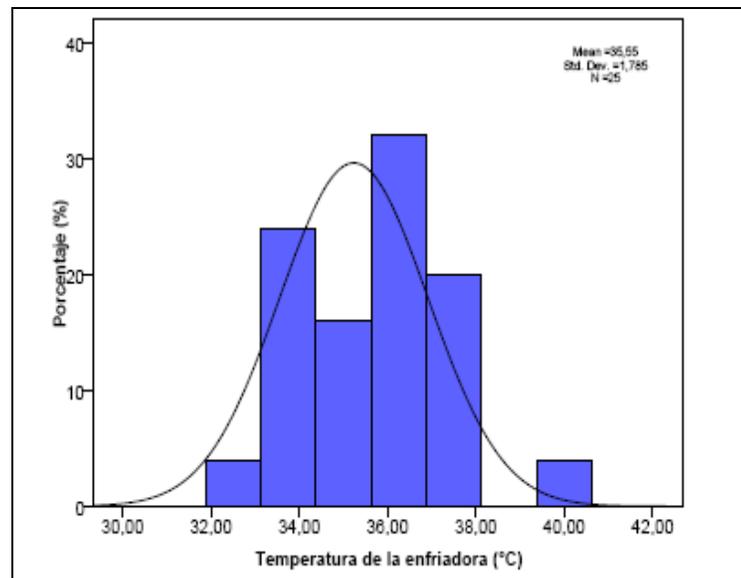


Figura 29.- Diagrama de frecuencia de la hojuela a la salida de la enfriadora.

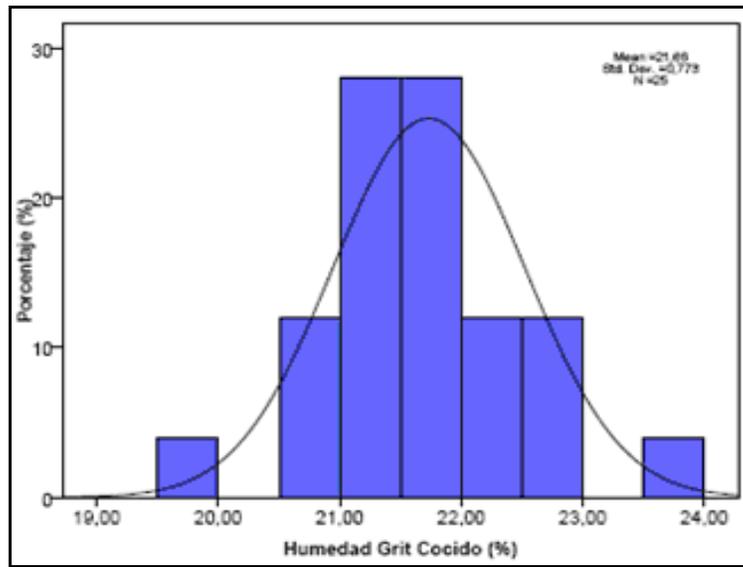


Figura 30.- Diagrama de frecuencia de la humedad del grit cocido.

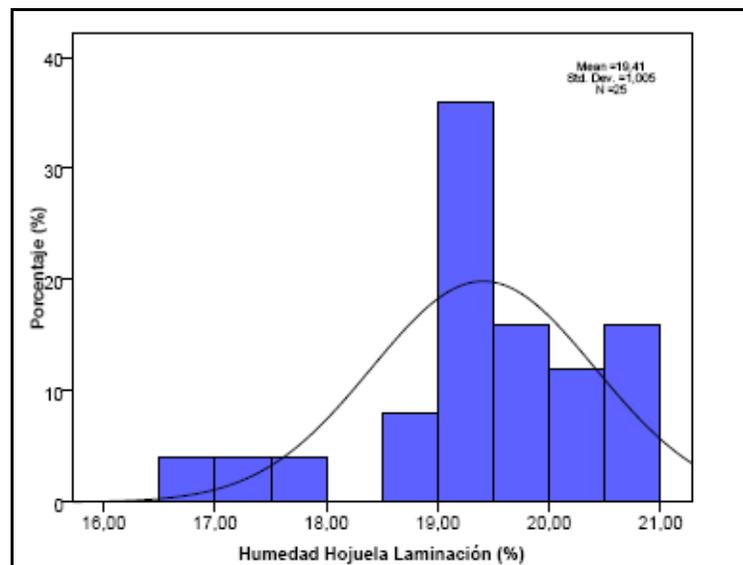


Figura 31.- Diagrama de frecuencia de la humedad de la hojuela laminada.

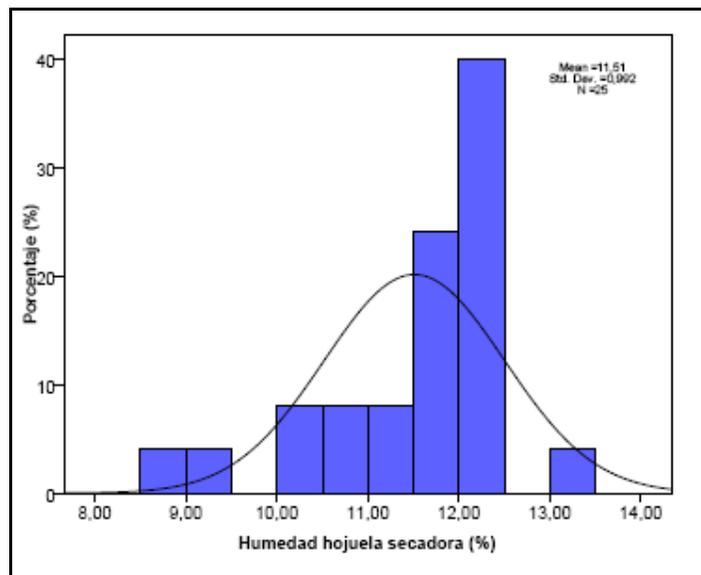


Figura 32.- Diagrama de frecuencia de la humedad de la hojuela a la salida de la secadora.

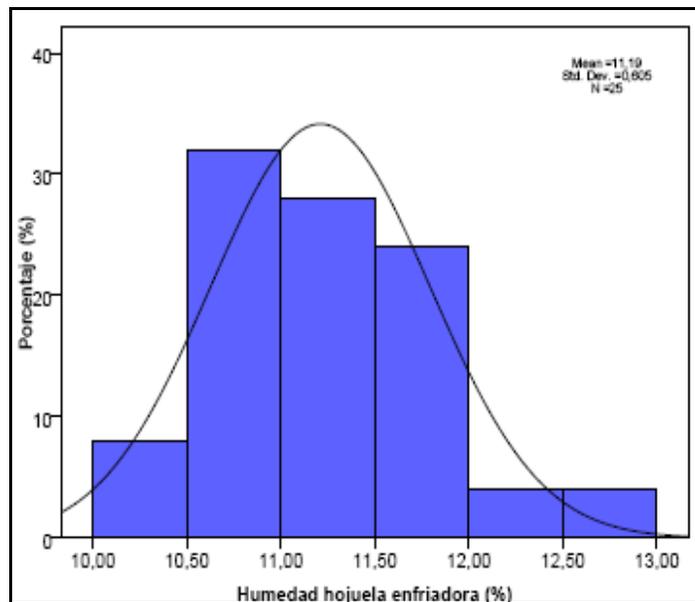


Figura 33.- Diagrama de frecuencia de la humedad de la hojuela a la salida de la enfriadora.

3.- Cálculo para la obtención del tiempo de residencia del proceso industrial

Para el cálculo se dispuso de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{10}{60} \frac{M}{F}$$

Donde:

t : Tiempo de residencia (min)

M : Capacidad de la cocina o el recipiente (kg)

F : Flujo másico (kg/10 s)

Sustituyendo los datos respectivos:

$M = 2776$ kg

$F = 12,60$ kg/10s

Se obtuvo:

$$t = \frac{10}{60} \frac{2776}{12,6} = 37 \text{ min}$$

Por ser una medida indirecta se procedió a calcular la propagación del error:

$$\Delta t = \left| \left(\frac{\partial t}{\partial M} \right)_{\bar{M}, \bar{F}} \right| \Delta M + \left| \left(\frac{\partial t}{\partial F} \right)_{\bar{M}, \bar{F}} \right| \Delta F$$

Sustituyendo las derivadas respectivas y sus valores tenemos:

$$\Delta t = \frac{10}{60} \left(\left| \frac{1}{12,60} \right| 97 + \left| \frac{2776}{(12,60)^2} \right| 1,42 \right) = 4,2 \text{ min}$$

Finalmente se obtuvo como valor para el tiempo de residencia:

$$t = (37 \pm 4) \text{ min}$$

4.- Cálculo para la determinación del modelo de regresión multivariante

En primera instancia se dispuso a normalizar las variables:

$$X_i = \frac{\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}_i}{\frac{rango_i}{2}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: X_i : Variable normalizada

ε_i : Variable a normalizar

$\bar{\varepsilon}_i$: Promedio de las variables a normalizar.

A continuación un ejemplo para la el tiempo de residencia:

$$t_- = \frac{26,6 \text{ min} - \left(\frac{26,6 + 36,4}{2} \right) \text{ min}}{\frac{9,8 \text{ min}}{2}} = \frac{-4,9 \text{ min}}{4,9 \text{ min}} = -1$$

De igual manera se realizó para las variables restantes y para el caso del Tamaño de partícula se le asigno al grit grueso -1 y al grit fino +1. Para hallar los coeficientes del modelo de regresion univariante de la ecuación 2. Requiere resolver el siguiente problema matricial:

$$Y = b \cdot X$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_j \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{j1} & x_{j2} & \dots & x_{jn} \end{pmatrix}$$

Donde:

Y: Matriz de respuesta

b: Matriz de coeficientes

X: Matriz de variables codificadas

y_n : Valor de respuesta

b_n : Coeficientes de las variables de respuesta

v_{jn} : Valores de las variables codificadas

Así la matriz de coeficientes se obtiene:

$$b = (X'X)^{-1} X'Y$$

Donde:

X' : Transpuesta Matriz de variables codificadas

$$X'X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

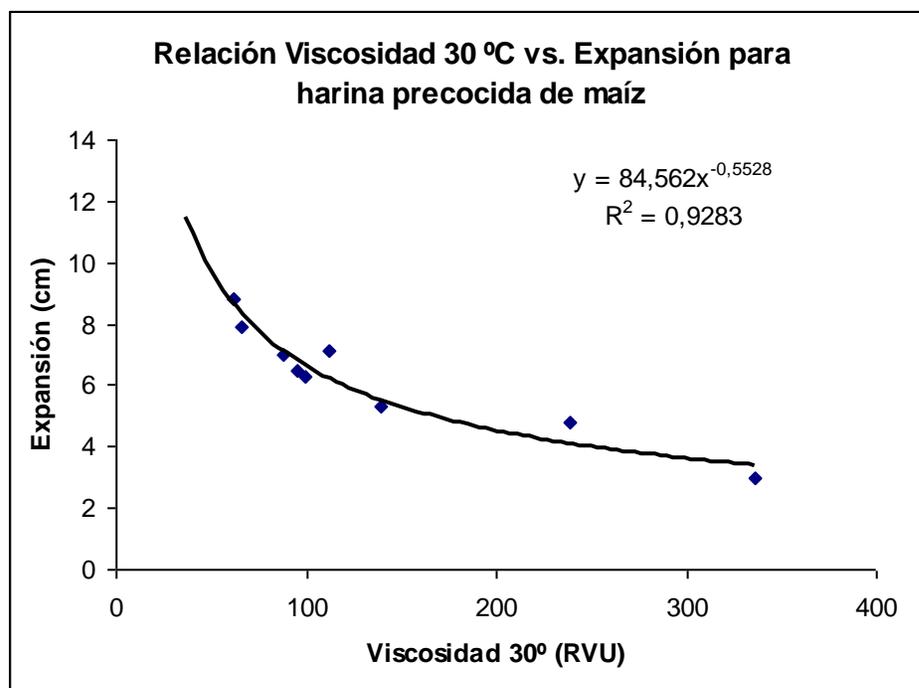
$$XX = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$

$$X^{-1} = \begin{bmatrix} 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 \end{bmatrix}$$

$$X'Y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 10,08 \\ 37,5 \\ 25,42 \\ 54,92 \\ 47,83 \\ 56,42 \\ 61,5 \\ 64,42 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 358,09 \\ 68,43 \\ 54,43 \\ 102,25 \\ -3,59 \\ -11,09 \\ -45,41 \\ -7,75 \end{bmatrix}$$

$$b = X^{-1}(X'Y) = \begin{bmatrix} 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 358,09 \\ 68,43 \\ 54,43 \\ 102,25 \\ -3,59 \\ -11,09 \\ -45,41 \\ -7,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 44,76 \\ 8,55 \\ 6,80 \\ 12,78 \\ -0,45 \\ -1,39 \\ -5,68 \\ -0,97 \end{bmatrix}$$

5.- Medición de la expansión indirectamente con la viscosidad final a 30 °C



Muestra	Viscosidad Final (RVU)	Expansión(cm)
Comercial 1	238,75	4,8
Comercial 2	112,33	7,1
Comercial 3	62,08	8,8
Comercial 4	99,83	6,3
Comercial 5	62,25	8,8
Comercial 6	139,5	5,3
Comercial 7	95,75	6,5
Comercial 8	335,92	3
Comercial 9	88,25	7
Comercial 10	65,5	7,9

6.- Ajustes de los parámetros de giro de rodillo y de la apertura de la rasera para la obtención del flujo a emplear en el equipo piloto

Tabla 19.- Ajuste de flujo

Tamaño de grit	Flujo(gr/min)	Velocidad giro del rodillo (rpm)	Apertura de la rasera (mm)
Grueso	550	6,5	9
	750	8	
Fino	550	6,5	5
	750	8	

7.- Características del equipo piloto

Capacidad de la cocina: 20Kg desde el inicio de contacto con vapor directo hasta la salida de la rasera.

Motores:

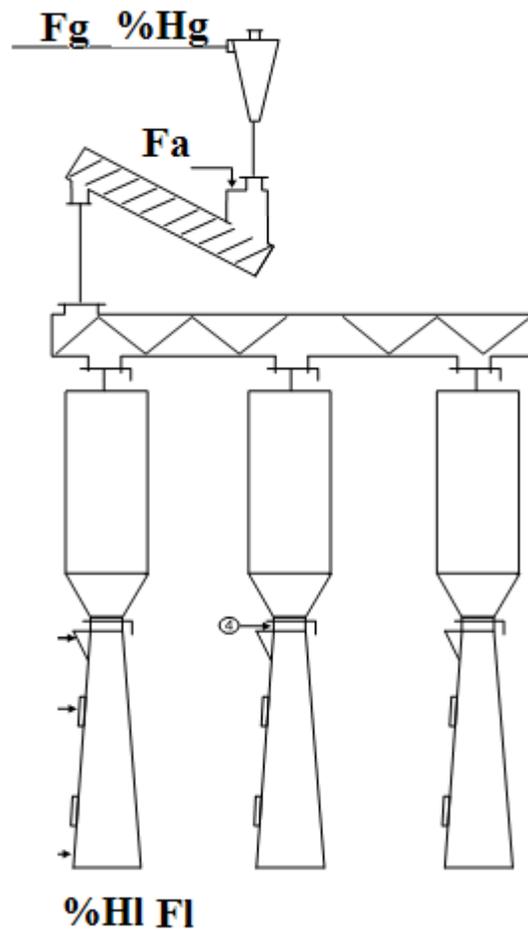
Laminadores: 2 Motoresreductores 2HPx160 rpm

Alimentador: 1 Motor reductor 1HPx 40 rpm

Cilindros laminadores: Altura 250mm y diámetro 250 mm

8.- Balance de masa para la obtención de relación de agua a grit usada en el proceso industrial

El diagrama de la línea de laminación es el siguiente:



Se asume que el flujo de masa seca que entra el proceso permanece constante desde la entrada hasta la salida:

$$M_{se} = M_{ss}$$

$$M_{ss} = F_T(100 - \%HI)$$

$$M_{SE} = Fg(100 - \%Hg)$$

Donde: M_{se} : Masa seca entrada

M_{ss} : Masa seca a la salida

F_T : Flujo total de los laminadores

F_g : Flujo de grit

% HL : Humedad promedio de laminación

% Hg : Humedad promedio de grit

Al sustituir en el balance de masa y despejar por el flujo de grit tenemos:

$$F_g = \frac{F_l(100 - \%HL)}{(100 - \%Hg)}$$

Donde: F_l : Flujo promedio por laminador

Al dividir el flujo de grit por el flujo de agua e invertirlas tenemos la relación deseada entre las variables.

$$\frac{F_A}{F_g} = \frac{F_A(100 - \%Hg)}{F_l(100 - \%HL)}$$

9.- Procedimiento de muestreo y registro de condiciones de operación.

Inicialmente se debe asegurar con el supervisor de turno si la línea esta operando de manera estable. Posteriormente se sigue de acuerdo a lo que se indica a continuación teniendo a la mano el formato de registro de variables.

1. Grit a la línea:

a. Materiales

- i. Bolsa plástica
- ii. Tomador de muestras cilíndrico

b. Procedimiento

- i. Identificar el (los) silo (s) que alimenta a la línea correspondiente y la tolva que lo(s) alimenta.
- ii. Introducir el tomador de muestras en ésta tolva y retirarlo realizar el procedimiento hasta completar la cantidad requerida.

2. Flujo de agua:

a. Materiales

- i. Tabla de conversión de valor leído a flujo real.

b. Procedimiento

- i. Lectura del valor en el rotámetro que alimenta a la línea correspondiente.
- ii. Convertir el valor leído en valor de flujo.
- iii. Registrar ambos valores en el formato correspondiente.

3. Temperatura de endospermo premojado:

a. Materiales:

- i. Pistola Infrarroja

b. Procedimiento:

- i. Apuntar con la pistola infrarroja en 5 distintos puntos en la parte superior del Bin.
- ii. Lectura del valor indicado en la pantalla de la pistola.
- iii. Registro de los valores en el formato correspondiente.

4. Temperatura en la cocina:

a. Procedimiento

- i. Lectura en las termocuplas a la salida de la cocina
- ii. Registrar los valores en el formato correspondiente.

5. Endospermo a laminación:

a. Materiales

- i. Envase plástico identificado con la cocina.
- ii. Toma muestras

b. Procedimiento

- i. Levantar la tapa del alimentador
- ii. Tomar muestra haciendo uso del tomador de muestras en cinco distintos puntos a lo largo del alimentador.
- iii. Llenar el envase con la muestra de cada cocina correspondiente y cerrarlo herméticamente.

6. Temperatura de los rollos laminadores:

a. Materiales

- i. Pistola infrarroja

b. Procedimiento

- i. Apuntar con la pistola a 3(izquierda, medio, derecha) puntos distintos del primer rollo.
- ii. Registrar cada uno de los valores en el formato correspondiente.

- iii. Repetir de igual manera que los ítem (i),(ii) para el rollo restante.

7. Hojuela Húmeda

a. Materiales

- i. Envase hermético, bolsa de cierre hermético o cualquier otro que prevenga la pérdida de humedad.

b. Procedimiento

- i. Introducir la bandeja y retirar la muestra colocarla inmediatamente en un recipiente hermético.
- ii. Dejar reposar la muestra hasta que alcance equilibrio en la humedad por al menos

8. Medición de flujo Laminado

a. Materiales

- i. Bandeja
- ii. Cronómetro de precisión a la centésima de segundo
- iii. Recipiente de al menos 20 lts.
- iv. Balanza. De al menos 10 kg.

b. Procedimiento

- i. Asegúrese que la bandeja este libre de hojuela y limpia.
- ii. Marque cero de referencia con el recipiente (vacío) y la balanza.
- iii. Introduzca la bandeja debajo de los rollos laminadores y simultáneamente active el cronómetro, mantenga la bandeja por aproximadamente 5 segundos. En ese instante detenga el cronómetro y extraiga la bandeja inmediatamente.
- iv. Vacíe el contenido entero de la bandeja en el recipiente, teniendo cuidado de no perder hojuela y determine el peso en la balanza.

- v. Registre tanto el peso como el tiempo con sus respectivas centésimas de segundo en el formato correspondiente.

9. Hojuela Seca:

a. Materiales

- i. Toma muestras
- ii. Recipiente o bolsa

b. Procedimiento

- i. Ubicar la salida de la secadora correspondiente a la línea en estudio
- ii. Abrir la compuerta y con el toma muestras retirar la hojuela seca y llenar el recipiente o bolsa.
- iii. Finalmente cierre o selle la bolsa.

10. Temperatura a la salida de Secadora:

a. Materiales

- i. Pistola Infrarroja

b. Procedimiento

- i. Señalar 4 distintos puntos a lo largo de la compuerta de la secadora.
- ii. Registrar los valores mostrados en la pantalla de la pistola en el formato correspondiente.

11. Temperatura de operación de la Secadora:

a. Procedimiento

- i. Registrar el valor indicado en la pantalla del controlador en el formato correspondiente.

12. Temperatura a la salida de enfriadora:

- a. Materiales
 - i. Pistola Infrarroja
- b. Procedimiento
 - i. Ubicar la ranura más baja de la unidad enfriadora de la línea en estudio.
 - ii. Apuntar con la pistola infrarroja en 2 puntos lo largo de la ranura de cada lado del enfriador.
 - iii. Registrar los valores en el formato correspondiente.

13. Hojuela a la salida de la enfriadora:

- a. Materiales
 - i. Cucharilla o toma muestras adecuado al tamaño de la ranura.
 - ii. Recipiente o Bolsa.
- b. Procedimiento
 - i. Ubicar la ranura más baja y seleccionar 4 puntos, iguales a los del ítem: 12.b.ii , o más.
 - ii. Haciendo uso del tomador de muestras retirar la hojuela y colocarla en el recipiente hasta llenarlo.