



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Estandarización de los parámetros de extrusión para asegurar la cocción del almidón en alimentos para mascotas

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

**Presenta:**  
Mariana Reséndiz Martínez

Dirigido por:  
Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla

Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla  
Presidente

  
Firma

Dra. Marcela Gaytán Martínez  
Secretario

  
Firma

MAP. José Agustín Martínez Rodríguez  
Vocal

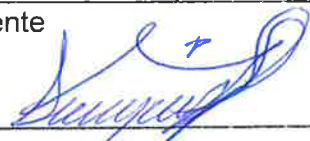
  
Firma

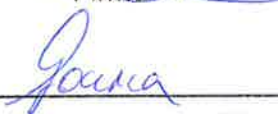
M. I. Javier García Pérez  
Suplente

  
Firma

M. C. Guillermo Hiyane Nashiro  
Suplente

  
Firma

  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

## RESUMEN

En la presente investigación los parámetros del proceso de extrusión de alimentos para mascotas fueron estudiados en un alimento súper premium para perros adultos, con el objetivo de aumentar el porcentaje de cocción de almidón a valores mayores al 77%, mejorando con ello la calidad del producto. Se aplicó un diseño factorial fraccionado con 4 factores de control, los cuales fueron agua, vapor, velocidad del motor y delta de temperatura de las recámaras del extrusor; 3 puntos centrales con 3 réplicas, por lo tanto, un total de 33 corridas a fin de determinar los factores significativos. Los resultados indicaron que los cuatro factores y la interacción entre el agua y el delta de temperatura influyen sobre la cocción del almidón, siendo el delta de temperatura el factor con el mayor efecto sobre la respuesta. Se obtuvo un modelo matemático capaz de predecir la cocción del almidón y se determinaron los niveles óptimos de los factores. Utilizando los niveles propuestos, se logró obtener un porcentaje de cocción de almidón aproximado al 92%.

**(Palabras clave:** extrusión, cocción de almidón, alimentos para mascotas, diseño factorial fraccionado, modelo matemático)

## SUMMARY

In this research the parameters of the pet food extrusion process were studied in a super-premium food formulated for adult dogs, with the goal of increasing the percentage of cooking starch to values up to 77%, thereby improving the quality of the product. Fractional factorial design, with 4 control factors which were water, steam, screw speed and chambers temperature's delta of the extruder, was applied; 3 central points with 3 replications, in total 33 runs to determine the significant factors. The results indicated that the four factors and the interaction between water and temperature's delta influences starch cooking, the temperature's delta was the factor with the largest effect on the response. A mathematical model capable of predicting the starch cooked was obtained and the optimal levels of the factors were determined. Using the proposed levels, a percentage of starch cooking approximate to 92% was obtained.

**(Keywords:** extrusion, cooking starch, pet food, fractional factorial design, mathematical model)

A Grupo Nutec por el apoyo brindado en todo momento, por siempre creer y  
confiar en mí.

A Pedro Ramírez por su amor y apoyo incondicional, por las palabras de aliento  
que siempre me impulsan a dar lo mejor de mí.

A mi familia, que es lo mejor y más valioso que Dios me ha dado.

## AGRADECIMIENTOS

A **Grupo Nutec** por brindarme todas las facilidades para realizar esta tesis, en especial a la MICP. Lucía Robles y el Ing. Christophe Jaguelin, ya que sin su apoyo y ayuda incondicional esto no hubiera sido posible.

A la Ing. Karla Arriaga y el Ing. Luis Miguel Urquiza, así como al Departamento de Calidad de la empresa por el apoyo y seguimiento brindado durante la realización de las pruebas en planta.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

A mi director de tesis, Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla, por sus atinados comentarios respecto a este proyecto y respecto a la decisión de realizar el posgrado con la industria. ¡Gracias!

A mis profesores de la Maestría, en especial al MI. Javier García Pérez, por su interés en el proyecto y todo el seguimiento brindado.

A mis compañeros y amigos de generación, gracias por toda la ayuda, por compartir sus conocimientos y por los excelentes momentos.

Por último, agradezco a mi familia, en especial a mi esposo Pedro, por todo su amor, paciencia y por todo el esfuerzo realizado durante mis estudios, éste es un logro de los dos. Gracias por estar conmigo en los momentos más turbulentos, por apoyarme incondicionalmente y por motivarme siempre. Te amo.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 HIPÓTESIS .....	5
1.2 OBJETIVO GENERAL .....	5
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1 EXTRUSIÓN.....	8
2.1.1 <i>Extrusor</i> .....	11
2.2 CAMBIOS QUÍMICOS DURANTE LA EXTRUSIÓN .....	14
2.3 GELATINIZACIÓN DEL ALMIDÓN .....	15
2.4 FACTORES QUE AFECTAN LA GELATINIZACIÓN DEL ALMIDÓN .....	18
2.4.1 <i>Contenido de agua</i> .....	18
2.4.2 <i>Velocidad del tornillo</i> .....	19
2.4.3 <i>Temperatura</i> .....	20
2.4.4 <i>Vapor</i> .....	21
2.5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	22
2.5.1 <i>Herramientas para el control de procesos</i> .....	22
2.5.2 <i>Gráficos de control</i> .....	22
2.5.3 <i>Análisis del sistema de medición</i> .....	24
2.5.4 <i>Capacidad de proceso</i> .....	25
2.5.5 <i>Diseño de experimentos</i> .....	28
2.5.6 <i>Componentes del diseño experimental</i> .....	30
2.5.7 <i>Principios del diseño de experimentos</i> .....	31
2.5.8 <i>Etapas en el diseño de experimentos</i> .....	32

2.5.9	<i>Clasificación de los diseños de experimentos</i> .....	34
2.5.10	<i>Diseño Factorial Fraccionado</i> .....	36
2.5.11	<i>Diseño central compuesto</i> .....	37
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>39</b>
3.1	LUGAR .....	39
3.2	FÓRMULA DE ALIMENTO .....	40
3.3	TOLVA DE ALIMENTACIÓN .....	41
3.4	PRE-ACONDICIONADOR .....	41
3.5	EXTRUSOR .....	42
3.5.1	<i>Monitor de operación</i> .....	45
3.6	MÉTODOS ANALÍTICOS .....	46
3.6.1	<i>Determinación de cocción de almidón</i> .....	46
3.6.2	<i>Determinación de peso específico</i> .....	53
3.6.3	<i>Determinación de las dimensiones (Grosor y corte)</i> .....	55
3.7	DESARROLLO DEL PROYECTO .....	56
3.7.1	<i>Definición de las variables de proceso</i> .....	56
3.7.2	<i>Análisis del sistema de medición</i> .....	57
3.7.3	<i>Análisis de estabilidad del proceso</i> .....	67
3.7.4	<i>Matriz del diseño de experimentos y niveles de operación de los factores</i> .....	71
3.7.5	<i>Realización del diseño experimental</i> .....	75
3.7.6	<i>Análisis de resultados</i> .....	78
3.7.7	<i>Validación de condiciones ideales resultantes</i> .....	79
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>80</b>
4.1	RESULTADOS OBTENIDOS .....	80

4.2	ANÁLISIS DE VARIANZA .....	80
4.3	ANÁLISIS DE RESIDUALES Y GRÁFICAS DE EFECTOS .....	85
4.4	GRÁFICAS DE CONTORNO .....	87
4.5	OPTIMIZADOR DE RESPUESTA .....	88
4.6	EFFECTO DE LOS FACTORES DE RUIDO .....	89
4.7	VALIDACIÓN DE LOS VALORES ÓPTIMOS .....	91
4.8	RECOMENDACIONES.....	93
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>94</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>96</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Estadística descriptiva para el porcentaje de cocción del almidón .....	3
Figura 1-2 Carta control Velocidad de motor del extrusor .....	4
Figura 2-1 Componentes de un sistema de extrusión (López, 2011) .....	9
Figura 2-2 Etapas del proceso de extrusión .....	11
Figura 2-3 Extrusor tornillo simple (Ramírez, 2011) .....	12
Figura 2-4 Extrusor de tornillo doble (Clextral, 2016) .....	13
Figura 2-5 Segmento de la estructura de amilosa (Meneses et al., 2007) .....	15
Figura 2-6 Segmento de la estructura de amilopectina (Meneses et al., 2007) ....	16
Figura 2-7 Gránulos de almidón sin gelatinizar (Rincón et al., 2009) .....	16
Figura 2-8 Gránulos de almidón gelatinizados (Rincón et al., 2009) .....	17
Figura 2-9 Efectos del contenido de agua inicial en el grado de gelatinización del almidón de extruidos (Lin et al., 1998) .....	19
Figura 2-10 Cambios en cocción de almidón (Ziggers, 2005) .....	20
Figura 2-11 Grado de cocción de almidón como función de distancia del dado del extrusor (Lin et al., 1998) .....	21
Figura 2-12 Proceso de selección de los gráficos de control (Vilar, 2005) .....	23
Figura 2-13 Estabilidad y capacidad de un proceso (Verdoy et al., 2006) .....	26
Figura 2-14 Esquema general de un proceso o sistema (Jiju, 2014) .....	29
Figura 2-15 Clasificación de los diseños experimentales (Gutiérrez and De la Vara, 2008) .....	35

Figura 2-16 Representación de un diseño factorial fraccionado $2^{3-1}$ (Gutiérrez y De la Vara, 2008).....	36
Figura 3-1 Planta Nueva Tecnología en Alimentación (Vista frontal). .....	39
Figura 3-2 Planta Nueva Tecnología en Alimentación (Vista posterior). .....	40
Figura 3-3 Termómetro Fluke con sonda de Inmersión.....	42
Figura 3-4 Diagrama del extrusor BIVIS BC92 NS AA (Manual Clextral).....	43
Figura 3-5 Partes de la linterna (Manual Cextral).....	44
Figura 3-6 Partes de las recámaras (Manual Clextral) .....	44
Figura 3-7 Partes del sistema de enfriamiento (Manual Clextral).....	45
Figura 3-8 Pantalla de visualización de proceso .....	45
Figura 3-9 Molino Retsch ZM 200 .....	48
Figura 3-10 Pesaje de muestras .....	48
Figura 3-11 Muestras en calentamiento .....	49
Figura 3-12 Muestras a introducir al autoclave.....	49
Figura 3-13 Adición de enzima e incubación de muestras .....	50
Figura 3-14 Muestras aforadas a 100mL .....	51
Figura 3-15 Espectrofotómetro UV .....	52
Figura 3-16 Adición de enzima.....	52
Figura 3-17 Determinación de peso específico en extruidos.....	54
Figura 3-18 Vernier digital Mitutoyo.....	55
Figura 3-19 Medición del corte de la croqueta .....	55

Figura 3-20 Medición del grosor de la croqueta .....	55
Figura 3-21 Diagrama de bloques proceso extrusión.....	56
Figura 3-22 ANOVA para peso específico .....	58
Figura 3-23 Estudio R y R del sistema de medición para peso específico .....	59
Figura 3-24 Gráficos del estudio R y R del sistema de medición para peso específico .....	60
Figura 3-25 ANOVA para grosor .....	61
Figura 3-26 Estudio R y R del sistema de medición para grosor.....	62
Figura 3-27 Gráficos del estudio R y R del sistema de medición para grosor.....	63
Figura 3-28 ANOVA para cocción de almidón.....	64
Figura 3-29 Estudio R y R para % de Cocción de Almidón .....	65
Figura 3-30 Gráficos del estudio R y R del sistema de medición para %Cocción de almidón.....	66
Figura 3-31 Gráfico de observaciones individuales para peso específico .....	67
Figura 3-32 Gráfico de rango móvil para peso específico .....	68
Figura 3-33 Capacidad de proceso del proceso de extrusión .....	70
Figura 3-34 Diseño factorial fraccionado $2^{4-1}$ codificado .....	73
Figura 3-35 Monitor de operación .....	75
Figura 3-36 Toma de muestra a salida de extrusor.....	76
Figura 3-37 Muestra a salida del extrusor .....	76
Figura 3-38 Muestras identificadas en laboratorio.....	78

Figura 4-1 Primer modelo optimizado automáticamente para el porcentaje de cocción de almidón (RStudio).....	81
Figura 4-2 Modelos generados para reducción de términos no significativos (RStudio).....	82
Figura 4-3 ANOVA final para el porcentaje de cocción de almidón (RStudio).....	83
Figura 4-4 Análisis de regresión del modelo (RStudio).....	83
Figura 4-5 ANOVA para cocción de almidón (Minitab 15).....	84
Figura 4-6 Regresión para cocción de almidón (Minitab 15).....	85
Figura 4-7 Gráfica de residuales para la cocción del almidón.....	86
Figura 4-8 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	86
Figura 4-9 Gráfica de efectos estandarizados.....	87
Figura 4-10 Gráfica de contorno para vapor y agua del extrusor.....	87
Figura 4-11 Gráfica de contorno para velocidad y temperatura del extrusor.....	88
Figura 4-12 Condiciones óptimas para la cocción del almidón.....	88
Figura 4-13 Gráfica de efectos principales para la relación señal/ruido de los datos.....	90
Figura 4-14 Gráfica de efectos principales para la media de los datos.....	90
Figura 4-15 Prueba t de Student.....	92
Figura 4-16 Diagrama de caja para el porcentaje de cocción del almidón.....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Clasificación de alimentos para mascotas de acuerdo a su calidad (Gómez, 2013) .....	6
Tabla 2-2 Composición nutricional de los alimentos para mascotas (Gómez, 2013) .....	7
Tabla 3-1 Composición nutricional del alimento .....	41
Tabla 3-2 Condiciones constantes del pre-acondicionador .....	42
Tabla 3-3 Preparación de muestras para su lectura en el UV .....	51
Tabla 3-4 Datos de peso específico .....	58
Tabla 3-5 Datos de grosor .....	61
Tabla 3-6 Datos de porcentaje de cocción de almidón .....	64
Tabla 3-7 Datos de peso específico .....	69
Tabla 3-8 Condiciones de operación del extrusor durante la experimentación .....	72
Tabla 3-9 Diseño factorial fraccionado sin codificar .....	74
Tabla 3-10 Condiciones de alimentador y pre-acondicionador .....	75
Tabla 3-11 Identificación de muestras .....	77
Tabla 4-1 Datos del porcentaje de cocción de almidón .....	80
Tabla 4-2 Resultados del porcentaje de cocción de almidón con desviación estándar .....	89
Tabla 4-3 Valores óptimos de proceso .....	91
Tabla 4-4 Resultados validación de condiciones óptimas de proceso .....	92

## 1. INTRODUCCIÓN

El 95% de la producción mundial de alimentos para mascotas es producida con tecnología de extrusión (Carciofi y Sá, 2014).

La extrusión puede definirse como un proceso que involucra el transporte de un material, bajo condiciones controladas, forzando a pasar por una boquilla de una dada geometría y con un caudal masivo pre-establecido, durante este transporte, se produce la cocción parcial o total de los componentes de la mezcla (López, 2011).

Las compañías de alimentos para mascotas y proveedores de equipos tienen como objetivo producir croquetas con mayor digestibilidad, lo cual es de importancia comercial para atraer al dueño de la mascota, en las decisiones de compra (Carciofi y Sá, 2014).

Estos alimentos son los únicos que en comparación con otros productos que se procesan mediante la cocción y extrusión, son una matriz alimentaria completa; debido a que incluyen requisitos nutricionales totales de la mascota, para cada comida o para un día entero (Gibson, 2015).

Una de las ventajas del proceso de extrusión es que realiza diversas funciones, como: el mezclado y unificación de ingredientes, amasado, cocción, alteración de textura y brinda la forma deseada al producto; a diferencia de otros métodos que necesitan varias fases o equipos para lograr el mismo resultado (Gibson y Alavi, 2013).

Durante el proceso de extrusión, se presentan diversos cambios físicos y químicos en los ingredientes de los alimentos para mascotas, que están directamente relacionados con la energía que se transfiere a la masa durante dicho proceso (Carciofi y Sá, 2014). El almidón es el producto que sufre más cambios y considerando que las dietas de los alimentos para mascotas contienen hasta un

50% de almidón derivado de los granos de cereales, es muy importante el papel que juega en el alimento terminado (Tran, 2008).

La mayor parte de la industria de alimentos para mascotas está convencida que el porcentaje de cocción del almidón, que resulta del proceso de extrusión, influye en la consistencia de las heces (relacionada directamente con la digestibilidad) y afecta el éxito de un producto en el mercado. Hoy en día, la tendencia del mercado está enfocada a alcanzar determinado porcentaje de almidón gelatinizado durante el proceso, por ello el desarrollo de nuevos productos está probando nuevas fuentes de carbohidratos y nuevas líneas de producción para lograr este objetivo (Aldrich, 2009).

Actualmente, en la empresa Nueva Tecnología en Alimentación S.A. de C.V. (NUTEC) el porcentaje de cocción del almidón, en los alimentos súper premium para mascotas es un parámetro que se mide pero no se asegura y que es muy importante en el producto final; ya que, si las heces llegan a ser excesivamente blandas o la mascota tiene diarrea, el dueño de la mascota a menudo lo interpreta como un problema de salud o un problema con la comida (Aldrich, 2009).

En Nutec, la forma de evaluar este parámetro consta de realizar pruebas en campo en unidades experimentales dónde el alimento es consumido por la mascota y durante el tiempo de prueba, diversos análisis son realizados a las heces frescas, incluida la digestibilidad de proteína. El tiempo involucrado consta de una semana, lo cual no permite hacer ninguna corrección en proceso, por lo que los resultados obtenidos son meramente para monitoreo.

Diversos trabajos científicos han investigado las variables que afectan a la cocción del almidón en el proceso de extrusión, sin embargo, son pocos los que se han realizado sobre una matriz similar a la de este proyecto, pero las semejanzas en el proceso permitieron la obtención de conclusiones importantes.

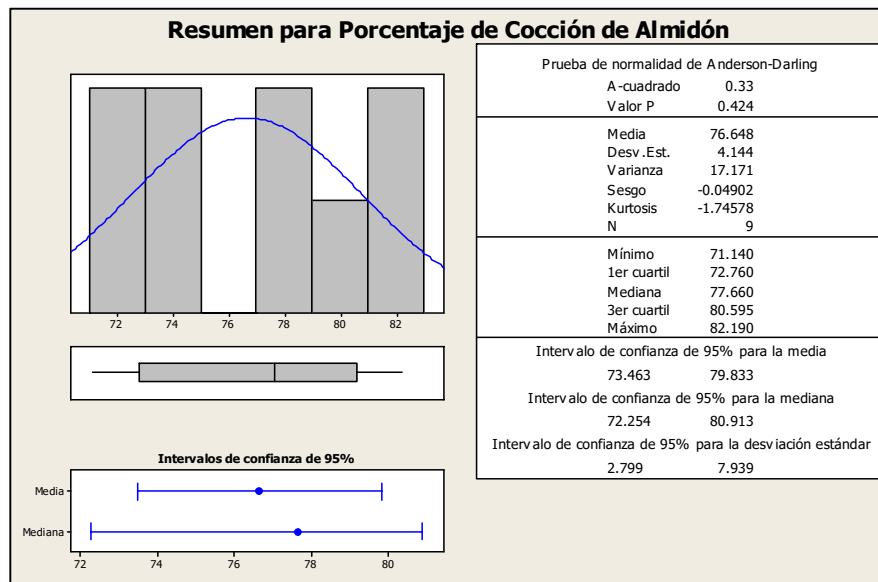
Por ejemplo, Storebakken (2015) investigó el efecto de la cantidad de agua sobre la cocción del almidón para 5 dietas diferentes de alimento para peces y

observó que se obtuvo una mejor cocción cuando la cantidad de agua fue mayor; los resultados de este trabajo enfatizaron la necesidad de utilizar el agua suficiente durante el proceso para garantizar una digestión eficiente del almidón.

Gibson (2015) investigó 3 tipos de alimentos para mascotas con diferentes inclusiones de carne fresca y concluyó que la energía térmica brindada en el extrusor, en este caso por el vapor, así como la energía mecánica brindada por el tornillo, consiguen completar la gelatinización y crear complejos amilosa-lípido.

Por su parte, Cai y Diosady (1993) encontraron que al aumentar la temperatura del barril del extrusor se aumentó la gelatinización del almidón, lo cual sucedió también al aumentar la velocidad del tornillo del extrusor, esto indicó que el cizallamiento contribuye significativamente a la cocción del almidón.

Debido a la problemática de la ausencia de control sobre la cocción del almidón en proceso, tratándose de un alimento súper premium, se recopilaron datos del historial de la empresa para conocer el estado actual de este parámetro en el proceso. La Figura 1-1 muestra la estadística descriptiva de los valores promedio mensuales que se obtuvieron para el producto de estudio por un período de 9 meses.

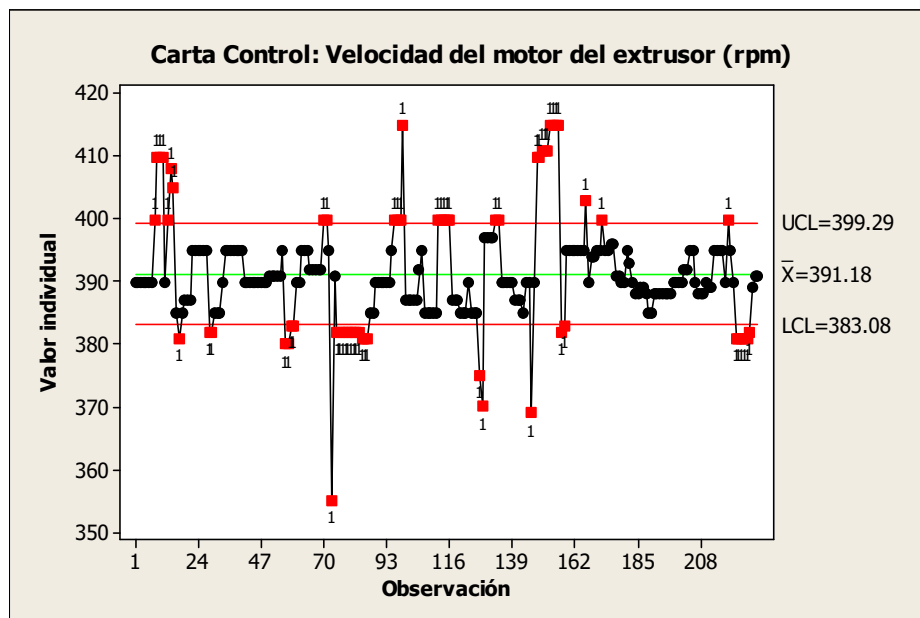


**Figura 1-1 Estadística descriptiva para el porcentaje de cocción del almidón**



Se observó que la media de los datos resultó de 76.65%, dicho valor está por debajo de la competencia cuyos valores de porcentaje de cocción de almidón se encuentran alrededor del 90%, dichos valores, se tomaron como referencia debido a que no existe una norma oficial que establezca los límites para este parámetro.

Mediante el historial también se observó que el proceso varía constantemente sin tendencia alguna, lo cual involucra tiempo en los arranques de línea, un ejemplo de ello se muestra en la Figura 1-2.



**Figura 1-2 Carta control Velocidad de motor del extrusor**

Esta tesis presenta la investigación de los efectos del proceso de extrusión sobre el parámetro de cocción del almidón en los alimentos para mascotas, para así lograr el aseguramiento del mismo; esto a través de un diseño de experimentos factorial fraccionado con 3 puntos centrales para el cual la temperatura, el agua, el vapor y la velocidad del motor del extrusor fueron las variables involucradas, teniendo como objetivo obtener valores mayores a 77% de cocción de almidón del producto a la salida del extrusor.

Este proyecto permitió la reducción de la variabilidad del proceso y del tiempo en los arranques de línea del producto, ya que, mediante el uso de herramientas estadísticas y el análisis de los resultados experimentales, se determinaron los niveles óptimos de cada una de las variables de proceso.

## **1.1 HIPÓTESIS**

Es posible aumentar el porcentaje de cocción de almidón en el producto (alimento para perros) mediante la parametrización de los factores temperatura, agua, vapor y velocidad del motor en el proceso de extrusión de alimentos para mascotas usando un extrusor BIVIS BC92 NS AA, con la ayuda de un diseño de experimentos factorial fraccionado con puntos centrales.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Mejorar el porcentaje de cocción de almidón del producto (alimento para perros), a valores mayores al 77%, a la salida del extrusor a través de un diseño de experimentos factorial fraccionado.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificación de los factores significativos en el proceso de extrusión.
- Determinar un modelo estadístico que pueda predecir el porcentaje de cocción de almidón en alimento para mascotas a partir de las variables de proceso.
- Establecer los niveles óptimos de las variables del proceso que aseguren un mayor porcentaje de cocción de almidón en el producto.

## 2. MARCO TEÓRICO

En algunos países, la mayoría de los propietarios de mascotas alimentan a sus animales de compañía con concentrados comerciales. Estos productos varían de acuerdo con el método de proceso usado, los ingredientes incluidos, contenido de humedad y métodos de preservación.

Los alimentos para mascotas se clasifican en Súper Premium, Premium y Económicos de acuerdo a su calidad global, tipo de ingredientes, disponibilidad y costo, algunas de sus características se muestran en la Tabla 2-1.

Tipo de alimento	Características
Premium	Nutrición óptima para mascotas durante diferentes estados de vida. Materias primas altamente digestibles con nutrientes disponibles en cantidades superiores. Producto segmentado por estilo de vida y diferencias de tamaño entre razas.
Súper premium	Incluyen materias primas de alta calidad con varios tipos de ingredientes funcionales para beneficios específicos de la salud de la mascota. Son productos formulados con ingredientes fijos que no varían con la disponibilidad o costo relativo de las materias primas.
Económicos	Producto que cumple los requisitos nutricionales al mínimo costo. Su formulación varía de acuerdo a la disponibilidad de las materias primas y el costo de las mismas. Involucran grandes cambios en palatabilidad y aceptación del alimento lote tras lote, además de alterar la digestibilidad.

**Tabla 2-1 Clasificación de alimentos para mascotas de acuerdo a su calidad (Gómez, 2013)**

De acuerdo al contenido de humedad, los alimentos para mascotas se clasifican en húmedos, semi-húmedos y secos; las características nutricionales de cada uno se muestran en la Tabla 2-2.

<b>Tipo de alimento</b>	<b>Nutriente</b>	<b>Valor</b>
Seco	Humedad (%)	6-12
	Grasa (%)	7-20
	Proteína (%)	16-30
	Carbohidratos (%)	41-70
	Energía metabolizable (Kcal/Kg)	2800-4050
Semi húmedos	Humedad (%)	15-30
	Grasa (%)	7-10
	Proteína (%)	17-20
	Carbohidratos (%)	40-60
	Energía metabolizable (Kcal/Kg)	2550-2800
Húmedos	Humedad (%)	75
	Grasa (%)	5-8
	Proteína (%)	7-13
	Carbohidratos (%)	4-13
	Energía metabolizable (Kcal/Kg)	875-1250

**Tabla 2-2 Composición nutricional de los alimentos para mascotas (Gómez, 2013)**

Dentro de esta clasificación, los alimentos húmedos pueden brindar una nutrición completa y balanceada o pueden ser un suplemento dietario ya sea en forma de galletas o productos enlatados, éstos contienen mezclas de ingredientes o pueden estar basados en carne y ser complementarios ya que no contienen vitaminas y minerales agregados.

Los alimentos semi-húmedos contienen 15% a 30% de humedad y son hechos de materias primas como tejidos animales frescos, granos, grasas y azúcares simples. Son más suaves en textura que los alimentos secos, lo cual contribuye a su aceptación y palatabilidad para algunos animales.

Los alimentos secos contienen entre 3% a 11% de agua. El alto contenido de materia seca de estos alimentos permite la expresión de diferentes conceptos de formulación. Esta categoría incluye alimentos extruidos, galletas horneadas, entre otros (Gómez, 2013).

Los alimentos secos constituyen el mayor segmento en cantidad y valor de los alimentos para mascotas vendidos en el mundo. La reducción del contenido de humedad de los alimentos para mascotas a un nivel bajo específico ofrece buenas

condiciones para el recubrimiento de la croqueta. Además, el bajo contenido de agua proporciona una óptima estabilidad durante el almacenamiento y el transporte.

La industria de alimentos para mascotas utiliza predominantemente la extrusión para la fabricación de los alimentos secos debido a la capacidad para pasteurizar, aumentar digestibilidad de nutrientes y su disponibilidad, así como la obtención de la densidad y forma deseada al producto en una sola aplicación (Tran, 2008).

## **2.1 Extrusión**

La extrusión es uno de los pocos procesos en la industria alimenticia que se ha mejorado continuamente desde su invención. Una de las áreas de aplicación de esta tecnología es en el procesamiento de cereales, donde la extrusión es usada para convertir las harinas de los cereales en pasta. Otra área de aplicación es el procesamiento de proteínas, en el que las proteínas vegetales son cocinadas para producir sustitutos de carne. La extrusión también se ha utilizado en muchas otras áreas, incluyendo productos de confitería, alimentos para mascotas e incluso aplicaciones de extracción y separación (Emin et al., 2016).

La tecnología de cocción por extrusión se utiliza para la fabricación de dietas de alimentos comerciales secos para caninos y felinos: aproximadamente el 95% de los alimentos para mascotas son extruidos. La razón para el uso generalizado de la cocción por extrusión es la versatilidad de esta tecnología para mezclar dietas, mejorar la funcionalidad, desintoxicar, esterilizar y texturizar una gran variedad de productos alimenticios y de sus ingredientes (Akhtar y Khan, 2015).

Al ser un proceso continuo con altos rendimientos y alta eficiencia energética, mejora textura y sabor, además de que brinda un absoluto control de la temperatura (López, 2011).

Los alimentos para mascotas extruidos se enfocan en la producción de alimentos para animales con alto valor nutricional pero baja utilidad económica. No obstante, el balance de componentes y el procesamiento cuidadoso están al centro de las consideraciones de calidad. Por lo tanto, la extrusión está demostrando cada vez más, ser la herramienta adecuada para producir la alimentación de la mascota moderna (Akhtar y Khan, 2015).

Este proceso permite un enfoque flexible para la fabricación del producto, el cual es preferido para satisfacer la demanda de los dueños de las mascotas. La extrusión es un proceso que consiste en humedecer alimentos o materias primas ricas en proteína y almidón, las cuales son cocidas dentro de un tubo con ayuda de humedad, temperatura, presión y fuerza mecánica (Lankhorst et al., 2007; Rahman et al., 2015).

La extrusión de alimentos para mascotas es una técnica de procesamiento continuo donde el cocimiento y formación de la croqueta se lleva a cabo en el extrusor. Tal como se observa en la Figura 2-1, como primer paso, todos los ingredientes secos son mezclados, con la excepción de agua y carne fresca o grasas, si la formulación requiere de esos ingredientes.

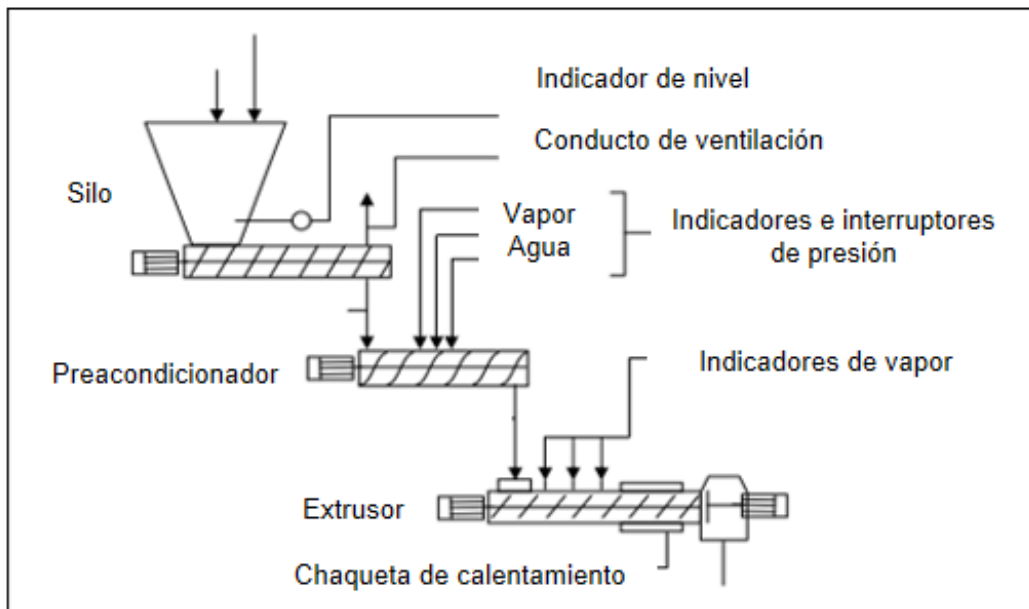


Figura 2-1 Componentes de un sistema de extrusión (López, 2011)

Después la mezcla seca es añadida en una tolva y se transporta al pre-acondicionador donde se añade agua y vapor para comenzar el ablandamiento y elevar la temperatura de la masa (Gibson, 2015).

La mezcla de ingredientes es empujada a través del cilindro del extrusor el cual consiste en un tornillo sin fin que gira continuamente; controlando la temperatura mediante bandas de enfriamiento y calentamiento (Tran, 2008).

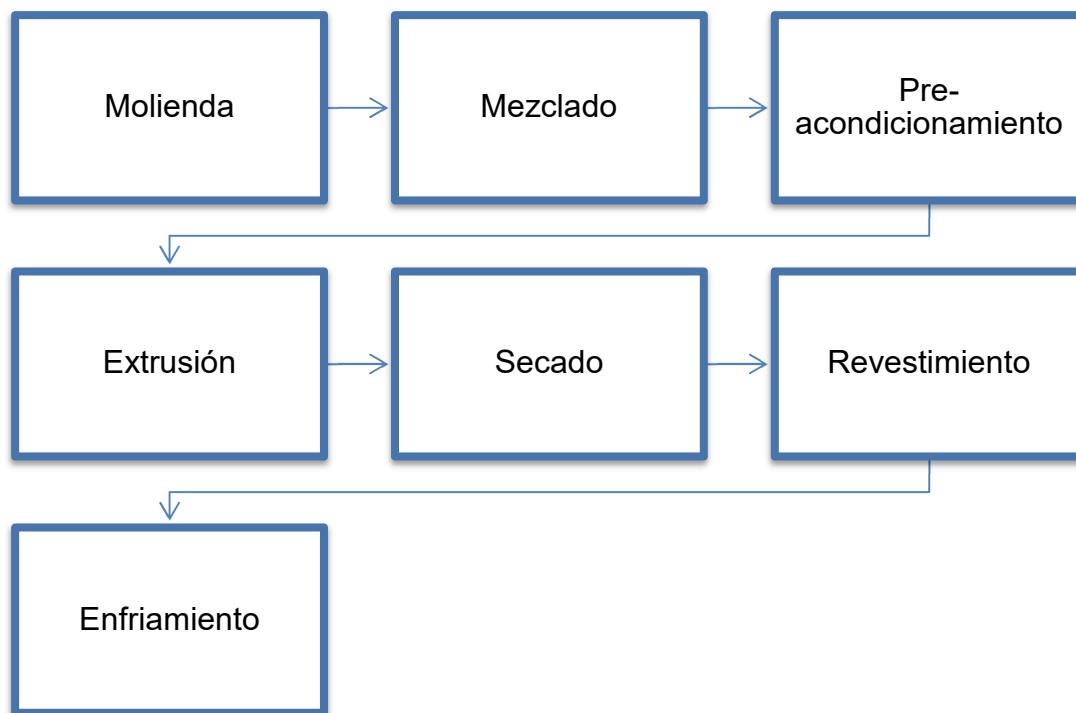
En el cilindro, la mezcla de ingredientes fluye hacia adelante, generando aumento en presión y temperatura que permite cocinar los almidones y matar a las bacterias dañinas. Al final del extrusor se coloca un troquel para crear contrapresión y formar el producto a medida que se expande la masa en la forma deseada. Así como el troquel, al final del cilindro, se ensamblan navajas que permiten cortar el alimento extruido con la longitud deseada (Gibson, 2015).

En este paso del proceso, el material está expuesto a altas temperaturas, hasta 200°C, durante 1-2 minutos o más. Por lo tanto, este proceso se clasifica como tratamiento de calor con temperaturas elevadas y corto período de acción. Al mismo tiempo, el material también está expuesto a una presión relativamente alta, que puede ir hasta 25 MPa (Puvača et al., 2012).

Posterior a la extrusión, como se observa en la Figura 2-2, las croquetas son transportadas a un secador, donde el exceso de humedad se expulsa para lograr un producto estable utilizando temperaturas alrededor de 105°C y tiempos de retención de 10-15 minutos (Gibson, 2015).

El tratamiento térmico y el almacenamiento ocasiona pérdidas en algunos nutrientes como vitaminas, los cuales se compensan con la inclusión de una mayor cantidad de estos o con procesos especiales de protección como la micro-encapsulación. En la extrusión, la temperatura esteriliza el alimento y el bajo contenido de humedad previene el crecimiento bacteriano y de hongos (Gómez, 2013).

Los extruidos son comúnmente rociados con un recubrimiento, con el fin de añadir sustancias que brinden aroma al extruido. Además, compuestos productores de energía son añadidos tal como los lípidos, y algunas veces el propósito es mejorar la estructura de la superficie. En la producción de alimentos para mascotas a menudo las suspensiones basadas en grasas y aceites son utilizadas como recubrimiento. Durante el proceso de revestimiento, la grasa caliente se aplica a los productos extruidos secos, la grasa aplicada se debe absorber de manera rápida y completa antes de que se enfríe. Dependiendo de los productos y los materiales usados para el revestimiento, puede ser utilizada otra etapa de secado o enfriamiento (Tran, 2008).



**Figura 2-2 Etapas del proceso de extrusión**

### **2.1.1 Extrusor**

El extrusor puede ser visto como una compilación de diferentes unidades tales como bombas, intercambiador de calor, bio-reactor para el transporte, mezcla,

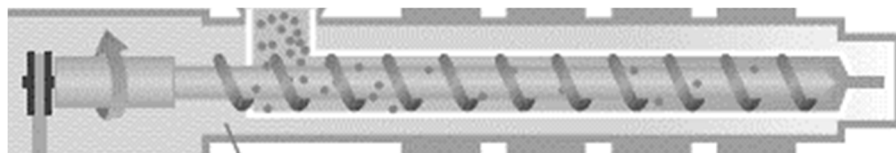


calentamiento, cizallamiento y la transformación de las materias primas que se introducen usando un alimentador (Garg, 2013).

Consiste en un tornillo sin fin que gira continuamente dentro de un barril cilíndrico; el cual, consta de bandas de enfriamiento y calentamiento para el control de la temperatura. Las materias primas a introducir al extrusor, mediante la tolva de alimentación, deben ser molidas y acondicionadas previamente. Los husillos, dentro del tornillo, sirven para empujar el producto hacia la boquilla del dado o matriz que le da la forma al producto (Tran, 2008).

Los tornillos pueden tener diferentes configuraciones: simple y doble tornillo. Cada tipo de extrusor tiene sus propias condiciones de operación, con ventajas y desventajas ya que, el calor del proceso típicamente altera la composición y la disponibilidad de los nutrientes (El-Khalek y Janssens, 2010; Puvača et al., 2012).

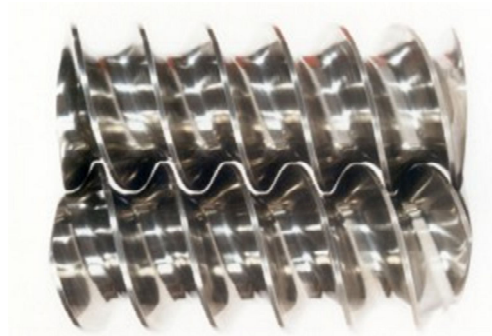
Los extrusores de tornillo simple, Figura 2-3, han estado en uso desde 1960 como proceso de un solo paso, para la producción de cereales listos para comer. Poseen un tornillo compresivo con disminución de la profundidad del canal de giro del tornillo, lo que provoca un aumento en la velocidad del giro aumentando el corte y la energía mecánica, aportando calor, resultado de la fricción ocurrida en el interior.



**Figura 2-3 Extrusor tornillo simple (Ramírez, 2011)**

Los extrusores de doble tornillo eran de uso común en la producción de alimentos en la década de 1980. Consisten en dos tornillos paralelos dentro de un cilindro (Figura 2-4), tienen un mayor grado de control y la flexibilidad del proceso lo hace atractivo para la industria alimentaria (Akhtar y Khan, 2015).

El perfil del tornillo de un extrusor de doble husillo en general se divide en diferentes zonas como alimentación, fusión, mezclado, desarrollo de la reacción, bombeo y conformación; similar a un extrusor de husillo único, pero el esfuerzo cortante generado es más en el caso de una extrusora de doble tornillo. Además, un extrusor de doble husillo presenta la característica de auto-limpieza si los tornillos tienen un perfil de engrane (Garg, 2013).



**Figura 2-4 Extrusor de tornillo doble (Clextal, 2016)**

Los extrusores tienen elementos comunes en diseño y función, pero no todos son iguales, así, pueden ser clasificados como húmedos o secos. La extrusión seca emplea niveles de humedad por debajo del 20% y no incluye pre-acondicionamiento, por tanto, su capacidad para procesar un amplio rango de ingredientes está limitada.

Los extrusores húmedos constan de varios componentes y se detallan a continuación: la masa del alimento entra por un canal que atraviesa un pre-acondicionador de vapor, llegando posteriormente al tambor del extrusor. El pre-acondicionador hidrata la masa hasta un 18-25% de humedad, y simultáneamente la calienta hasta los 80-95° C en un plazo de tiempo de hasta 5 minutos. Esta fase, unida a hélices de conducción-positiva en la extrusión, permite procesar alimentos con hasta un 27% de grasa.

El tambor de extrusión, contiene una serie de hélices y de cierres en cizalla, que conducen y extrusionan el material a través de los orificios de la matriz,

controlando el tamaño y la forma del gránulo final. El vapor, se inyecta en el tambor de extrusión para alcanzar las condiciones de procesado. El tiempo de retención en el tambor de extrusión puede ser tan bajo como 12 segundos (López, 2011).

## **2.2 Cambios químicos durante la extrusión**

Durante el proceso de extrusión, se presentan diversos cambios físicos y químicos en los ingredientes de los alimentos para mascotas, que están directamente relacionados con la energía que se transfiere a la masa durante dicho proceso (Carciofi y Sá, 2014).

Los cambios pueden implicar la formación de puentes disulfato en proteínas y la formación de productos de Maillard, de la reacción entre aminoácidos alcalinos y azúcares reductores. La cocción por extrusión rompe glóbulos de aceite para hacer aceite libre de fácil expansión. También texturiza a las proteínas, causa desnaturalización de las mismas y gelatinización del almidón.

El proceso de extrusión afecta las características nutricionales de los productos extrudidos cambiando la disponibilidad de las proteínas y altera la estructura de los carbohidratos (Tran, 2008).

Los beneficios de un tratamiento térmico, tal como la extrusión incluyen: brindar la forma deseada, inactivar factores anti-nutricionales, aumentar la vida de anaquel y la digestibilidad de los nutrientes además de la palatabilidad. Al aplicar la cocción por extrusión también se pueden presentar reacciones adversas, tales como: pérdida de vitaminas, oxidación de lípidos y reducción en la disponibilidad de aminoácidos, en particular de lisina (Lankhorst et al., 2007).

Sin embargo, la tarea principal de la extrusión de alimentos para animales domésticos es cocinar el almidón. Normalmente, el grado de almidón cocido en los alimentos es aproximadamente de 80-90%. Este porcentaje es decisivo, desde lo

nutricional, así como desde el punto de vista de calidad. Mejor cocción de almidón, mejor calidad (Ziggers, 2005).

Las condiciones óptimas de proceso, deben ser determinadas con el objetivo de minimizar lo indeseable y aumentar los efectos deseables de la extrusión en los alimentos para mascotas (Lankhorst et al., 2007).

### 2.3 Gelatinización del almidón

El almidón es profundamente alterado durante el proceso de extrusión. Químicamente, los almidones son polisacáridos de glucosa, compuestos de  $\alpha$ -glucanos: amilosa y amilopectina. Ambas tienen masas moleculares elevadas y consisten de unidades repetidas de (1-4)- $\alpha$ -D-glucopiranososa.

Como se muestra en la Figura 2-5 y Figura 2-6, la amilosa es esencialmente lineal mientras que la amilopectina es altamente ramificada, a través de enlaces (1 $\rightarrow$ 6)- $\alpha$ , con una estructura tipo clúster.

Los gránulos de almidón muestran birrefringencia cuando se observan bajo la luz polarizada, lo que indica un cierto grado de organización molecular; se ha demostrado que el almidón granular tienen una cristalinidad global aproximadamente de 20-45% (Souza y Andrade, 2002).

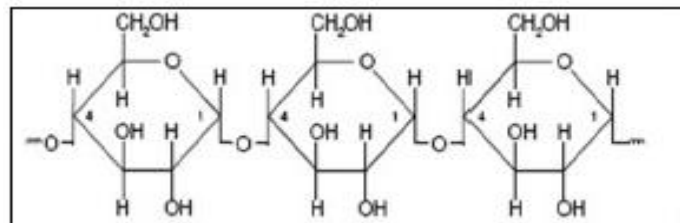
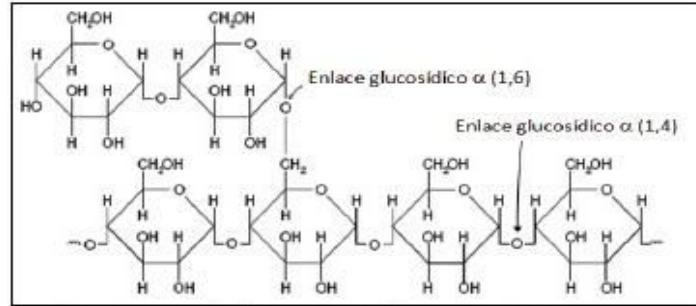


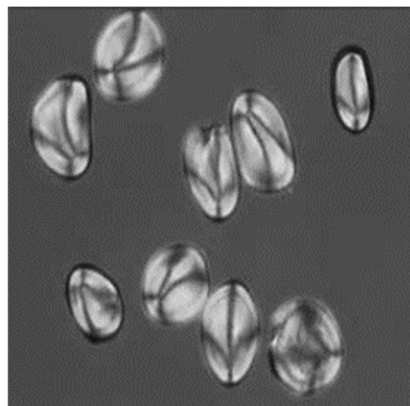
Figura 2-5 Segmento de la estructura de amilosa (Meneses et al., 2007)



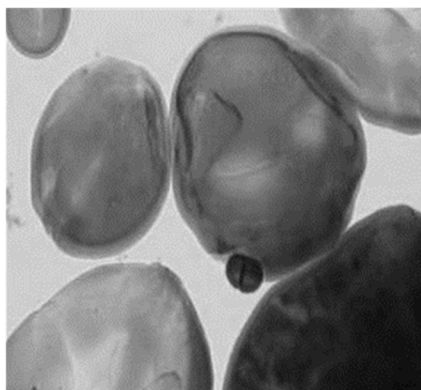
**Figura 2-6 Segmento de la estructura de amilopectina (Meneses et al., 2007)**

Los almidones con mayor contenido de amilosa se consideran menos digestibles. La proporción de los dos polisacáridos varía de acuerdo a su origen, que es de gran importancia para las propiedades químicas y funcionales de un almidón. Esta influencia puede ser atribuida a la distribución del tamaño del gránulo, cristalinidad, organización de las moléculas o naturaleza química de los polímeros del almidón (El-Khalek y Janssens, 2010).

Durante la extrusión, en presencia de agua, calor, cizallamiento y presión, los gránulos de almidón se someten al fenómeno de la gelatinización, donde se hinchan, se funden y pierden su estructura cristalina (Figura 2-7 y Figura 2-8) (Carciofi y Sá, 2014).



**Figura 2-7 Gránulos de almidón sin gelatinizar (Rincón et al., 2009)**



**Figura 2-8 Gránulos de almidón gelatinizados (Rincón et al., 2009)**

Al perder su estructura, el almidón, aumenta su viscosidad, formando un gel, el cual es sensible a factores como temperatura, agitación, velocidad de calentamiento o enfriamiento, esta sensibilidad va a depender de la fuente del almidón y otros componentes.

La gelatinización es una fase homogénea formada bajo tratamiento térmico. La viscosidad aumenta durante la gelatinización, y las propiedades de los geles de almidón son muy sensibles a factores como corte, temperatura, velocidad de calentamiento o enfriamiento y por supuesto, la fuente de almidón y la presencia de otros componentes (El-Khalek y Janssens, 2010).

Al final, se logra la solubilización de la amilosa, por el rompimiento tanto de los puentes de hidrógeno entre ésta y la amilopectina, con ello se obtiene un incremento en la susceptibilidad a la degradación enzimática, en especial, la hidrólisis en monómeros de glucosa para posterior absorción de las células epiteliales del intestino delgado (Gómez, 2013).

El almidón gelatinizado tiene la propiedad de volverse más soluble en agua y más susceptible a la degradación enzimática que el almidón no gelatinizado, por lo tanto, se presentan altos coeficientes de digestibilidad para los gatos y perros (Carciofi y Sá, 2014).

## **2.4 Factores que afectan la gelatinización del almidón**

Los extrusores de alimentos generalmente permiten el control de los ajustes y la configuración de la máquina con el fin de obtener una combinación de los diversos parámetros de proceso. Las variables de proceso determinan qué influencia se ejerce sobre el producto, la optimización de la desnaturalización de las proteínas, gelatinización del almidón y/o modificación de los glóbulos de grasa puede lograrse mediante el proceso selectivo.

### **2.4.1 Contenido de agua**

La humedad es una de las variables de proceso más importantes, la penetración de humedad completa de las partículas de ingredientes da como resultado un aumento de la transferencia de calor que puede resultar en la gelatinización del almidón de manera uniforme y un producto cocido completamente incluso con un alto contenido de grasa.

Cuando se extrude en un bajo contenido de humedad, los gránulos de almidón se transforman parcialmente a través de la aplicación de calor (pérdida de la estructura cristalina) y esfuerzo constante (fragmentación granular) que conduce a la formación de una fase homogénea por la gelatinización del almidón.

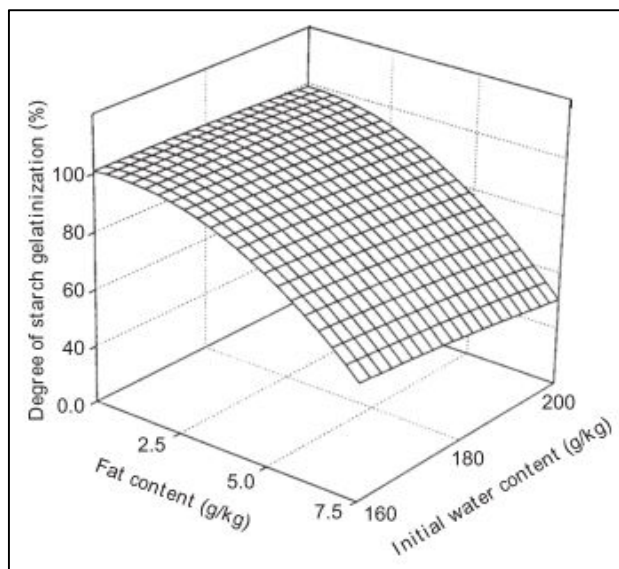
A un alto contenido de agua y alta temperatura de extrusión, resulta en una completa gelatinización (Tran, 2008).

Rahman et al., 2015 reportó que al incrementar el contenido de agua se redujo el porcentaje de gelatinización de los productos durante el proceso de extrusión; concluyó que se requiere una relación agua/almidón 1.5:1 para una gelatinización completa, y una relación agua/almidón 0.3:1 para que se inicie el proceso de gelatinización.

Storebakken et al. (2015), encontraron que el grado relativo de la gelatinización del almidón era muy reducido cuando se limitaba o excluía la adición

de agua en el barril de la extrusora, por lo que concluyeron que este fenómeno es altamente dependiente de la cantidad de agua disponible.

Tal como se muestra en la Figura 2-9, Lin et al. (1998), observaron que, al aumentar el contenido de agua inicial, la tendencia era a disminuir el grado de cocción del almidón de los productos extruidos. Sin embargo, dicho efecto no fue muy significativo en el rango estudiado (160 a 200 g/kg). Esto se puede explicar debido a que, al aumentar el contenido de agua, la temperatura en el extrusor disminuye.



**Figura 2-9 Efectos del contenido de agua inicial en el grado de gelatinización del almidón de extruidos (Lin et al., 1998)**

#### **2.4.2 Velocidad del tornillo**

La velocidad del tornillo tiene un efecto mayor en la gelatinización del almidón del extruido, ya que influye en la calidad nutricional de los mismos. Ha sido reportada la reducción en la gelatinización del almidón al aumentar la velocidad del tornillo durante el procesamiento. Se concluye que el aumento de la velocidad del tornillo reduce el tiempo de retención de la muestra en el extrusor, disminuyendo el grado de su cocción. Los cambios de velocidad del tornillo, dan como resultado



cambios en la temperatura de los productos, afectando así a la gelatinización de almidón (Rahman et al., 2015)

Cuando aumenta la velocidad del tornillo, la energía suministrada por la fricción también aumenta debido a que es proporcional a la velocidad de las partículas de polvo en el barril. Al mismo tiempo, la cantidad de transferencia de calor por conducción desde la pared del cilindro disminuye al aumentar la velocidad de las partículas, ya que el tiempo de residencia del producto en la pared del barril caliente disminuye (Lin et al., 1998).

Ziggers (2005), probó un extrusor con el cual se obtuvieron mayores porcentajes de cocción de almidón, y observó que al incrementar la velocidad del tornillo, la cocción de almidón disminuye de un 100% a un 90.1% (Figura 2-10).

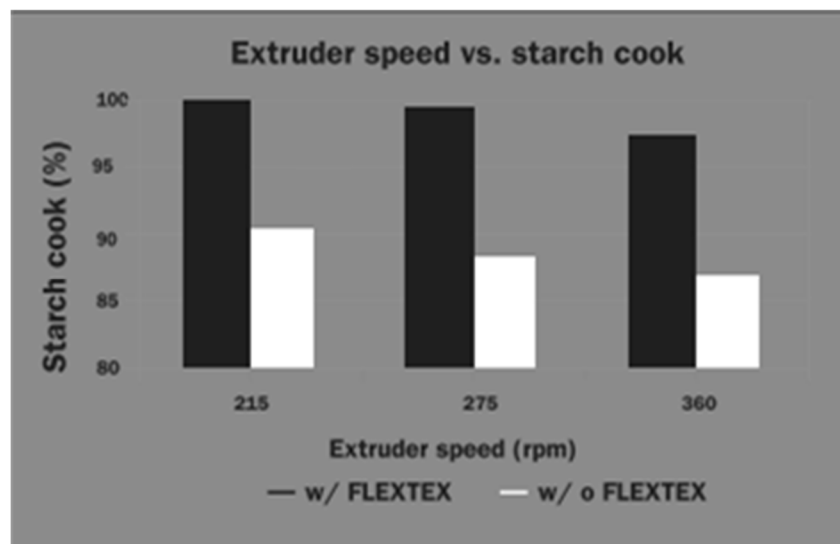
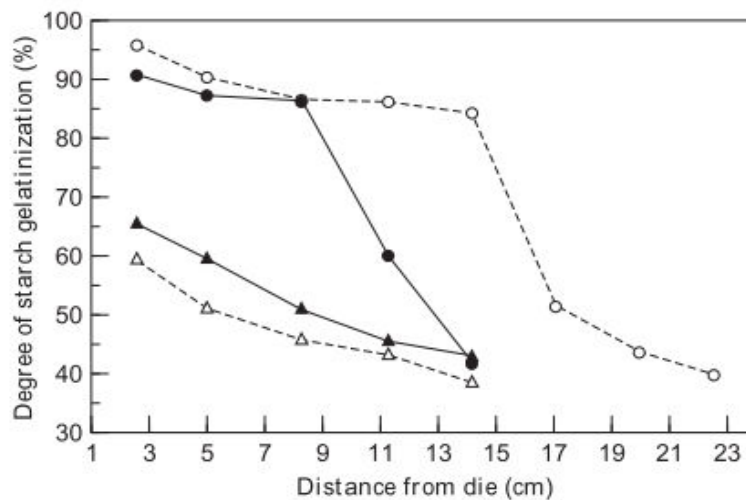


Figura 2-10 Cambios en cocción de almidón (Ziggers, 2005)

### 2.4.3 Temperatura

El grado de cocción de almidón depende de la temperatura de la masa. Por ello es necesario normalizar la temperatura y la humedad durante el proceso de extrusión porque la fluctuación de la temperatura puede ser capaz de afectar el proceso de gelatinización del almidón (Rahman et al., 2015).

Lin et al (1998), observaron que la variable crítica para la transición del almidón en el extrusor era la temperatura. Se presentaron cambios importantes en la gelatinización del almidón en el cilindro del extrusor a principios de la zona de cocción y continuó a lo largo de la misma, esto se explica debido a que en este segmento se encuentra la mayor entrada de energía (niveles más altos de temperatura). En el segmento completamente lleno, el área de transferencia de calor entre el material y el barril se aumentó al máximo debido al relleno del canal, por lo que hubo mayor transferencia de energía, como lo muestra la Figura 2-11.



**Figura 2-11 Grado de cocción de almidón como función de distancia del dado del extrusor (Lin et al., 1998)**

#### **2.4.4 Vapor**

La inyección de vapor en el extrusor es también un factor que contribuye a la cocción del almidón. Este aporte adicional de energía se traduce en aumentos de capacidad tales como mayor tolerancia a altos niveles de grasa en las formulaciones y menores necesidades de grandes motores de accionamiento.

En general, la reducción del contenido de agua se inyecta en el producto sin disminuir el nivel de vapor de agua añadido al producto, con el fin de ayudar a la expansión (cocción de almidón). Sin embargo, cuando la extrusión de

formulaciones que contienen alto contenido de proteínas (por encima de 23%) o altas en grasa (por encima de 5%), es necesario aumentar la humedad total agregando ambos, agua y vapor de agua (Rokey et al., 2010).

## **2.5 Fundamentos teóricos**

### **2.5.1 Herramientas para el control de procesos**

El control de los procesos con la utilización de herramientas estadísticas es un método de mejora continua de la calidad a partir de la reducción sistemática de la variación de aquellas características que más influyen en la calidad de los productos o servicios, mediante el seguimiento, control y mejora de los procesos.

Con los métodos tradicionales, la adecuación del producto o servicio a las necesidades y exigencias del cliente está asociada a la actividad de evaluación del producto final para separar las unidades que no cumplen tales exigencias.

El control de los procesos es una actividad enfocada hacia la prevención y, por lo tanto, los gastos que implica su implantación, más que un costo, son una buena inversión (Vilar, 2005).

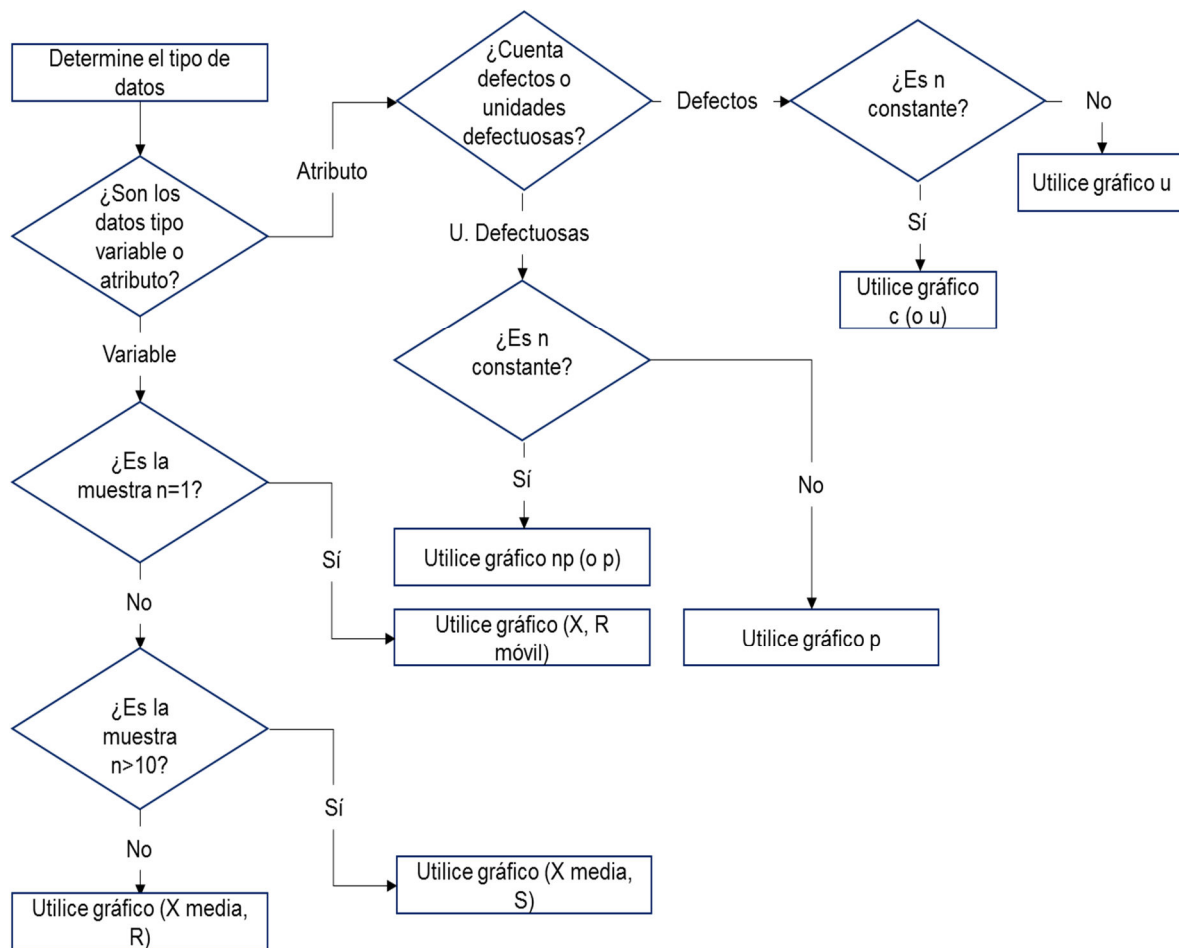
### **2.5.2 Gráficos de control**

Un gráfico de control es un gráfico en el que se representa el comportamiento de un proceso anotando sus datos ordenados en el tiempo. El objetivo principal de los gráficos de control es detectar lo antes posible cambios en el proceso que puedan dar lugar a la producción de unidades defectuosas, y ello se consigue minimizando el tiempo que transcurre desde que se produce un desajuste hasta que se detecta (Verdoy et al., 2006).

Existen fundamentalmente dos tipos de gráficos de control: gráficos de control por variables y por atributos. Cuando la característica a estudiar es de tipo

cuantitativo (intervalo o radio) se utiliza el gráfico de control por variables, mientras que cuando la característica sea de tipo cualitativo (nominal u ordinal) utilizaremos los gráficos de control por atributos (Vilar, 2005).

En el flujograma de la Figura 2-12, se muestra un resumen del proceso de selección del gráfico de control a utilizar.



**Figura 2-12 Proceso de selección de los gráficos de control (Vilar, 2005)**

En el caso de gráficos de control por variables, el criterio fundamental es el tamaño de la muestra utilizado. Existen situaciones de fabricación en las que no es posible conseguir un grupo de elementos representativos de una sola fabricación:

- Procesos de fabricación lentos en los que se plantean inconvenientes para acumular muestras con las que analizar el proceso.
- Procesos que exigen el análisis de 100% de las piezas.
- Ensayos destructivos.

En estos casos, los gráficos utilizan muestras de tamaño la unidad ( $n=1$ ), denominados gráficos de valores individuales y recorrido móvil (XI, RM). Cuando sea factible la recogida de más de un elemento en cada muestra, y el tamaño de muestra sea inferior a 10 ( $n<10$ ), son muy útiles los gráficos de medias muestrales y recorridos. Estos gráficos se basan en que, para estos tamaños de muestra, el recorrido R proporciona una adecuada estimación de la variación del proceso.

Cuando el tamaño de muestra sea superior a 10 ( $n>10$ ), el recorrido deja de proporcionar una estimación correcta de la variación, siendo necesario utilizar los gráficos de medias muestrales y desviaciones típicas. Los denominados gráficos  $\bar{X}, S$ .

En el caso de gráficos de control por atributos, la selección depende del tipo de datos utilizados. Cuando se trata de unidades defectuosas, se utilizan los gráficos p y np. Los primeros pueden utilizarse tanto para tamaño de muestra fija como variable. Los segundos exigen que el tamaño de la muestra sea fijo.

Cuando se trata de defectos, se utilizan los gráficos u y c. Igual que antes, los primeros pueden utilizarse tanto para tamaño de muestra fija como variable. Los segundos exigen que el tamaño de muestra sea fijo (Vilar, 2005).

### **2.5.3 Análisis del sistema de medición**

Un aspecto de gran importancia y muchas veces olvidado es el hecho de que una fuente importante de error es debida a variaciones en el sistema de medida de la respuesta. Esto ocurre, bien sea porque las mediciones se realizan con poco

cuidado o bien porque los instrumentos de medida son poco precisos (Prat et al., 1997).

### **2.5.3.1 Gage R y R**

La prueba R y R se refiere a una prueba de repetibilidad y reproducibilidad. Prueba se refiere al instrumento o equipo usado para las mediciones.

La repetibilidad es la variación observada cuando la misma persona mide la misma parte o producto con el mismo equipo, en otras palabras, es la variación del instrumento de medición.

La reproducibilidad es la variación observada cuando personas diferentes miden la misma parte o producto con el mismo instrumento con el fin de observar la variación del analista (Harris, 2002).

### **2.5.4 Capacidad de proceso**

La capacidad cuantifica la relación entre la incertidumbre del proceso y la tolerancia admitida en diseño. Para evaluar la capacidad se emplean dos parámetros que reflejan la estrechez de la distribución y su margen o reserva respecto a los límites de tolerancia.

Un proceso es capaz si los límites de su distribución se hallan dentro de los límites de tolerancia del producto. Un proceso es estable puede ser incapaz, es decir salirse del campo de tolerancia, porque su función de distribución es más ancha o está desplazada hasta uno de los límites de dicho campo. El sentido positivo para que un proceso sea capaz, se deben cumplir simultáneamente dos condiciones:

- Debe ser estrecho
- Debe tener un margen suficiente hasta los dos límites de tolerancia

En la Figura 2-13, el gráfico del ángulo inferior izquierdo muestra un comportamiento inestable e incapaz; el caso del cuadro inferior derecho, es estable pero incapaz, debido a su gran dispersión; en el ángulo superior izquierdo, se compara este segundo comportamiento con los límites de tolerancia prefijados por diseño: se observa que es un proceso capaz pero inestable; finalmente, en el ángulo superior derecho se presenta un ejemplo de proceso controlado y capaz, es decir, se comporta de modo estable y respeta los límites.

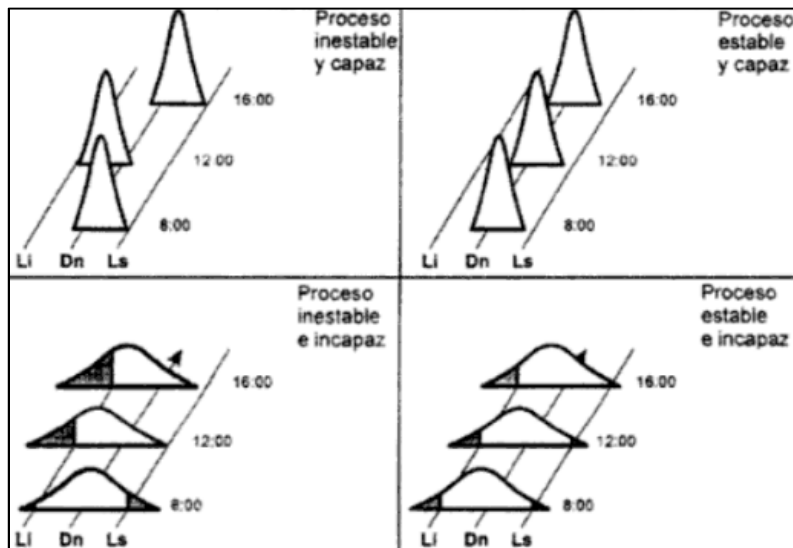


Figura 2-13 Estabilidad y capacidad de un proceso (Verdoy et al., 2006)

#### 2.5.4.1 Índices de capacidad

Los índices de capacidad comparan la capacidad del proceso con las especificaciones técnicas requeridas. Para definir la capacidad de un proceso de emplean dos índices,  $C_p$  y  $C_{pk}$  definidos matemáticamente.

$C_p$  indica la estrechez relativa del proceso respecto a la tolerancia de diseño, igual al séxtuplo de la desviación típica, dispuesta simétricamente alrededor del valor medio. Dentro de este campo se encuentran, en un proceso dominado, más del 99% de los valores. Si la dispersión coincide con la tolerancia (límite superior – límite inferior), resulta  $C_p=1$ . El  $C_p$  pretende ver en conjunto, si un proceso

está dentro de los límites, sin tener en cuenta el descentrado de las muestras del valor nominal. Si  $C_p > 1$  el proceso es capaz, si  $C_p = 1$  el proceso es estrictamente capaz, si  $C_p < 1$  el proceso no es capaz. Es frecuente utilizar el valor  $C_p = 4/3 = 1.33$  como límite inferior de la calidad que debe tenerse en la práctica. Esto implica que:

$$C_p = \frac{LTS - LTI}{6\sigma} = \frac{4}{3} \rightarrow LTS - LTI = 8\sigma$$

Por tanto, serían defectuosos aquellos artículos que estén a más de  $4\sigma$  de la media, esto es aproximadamente, 64 piezas por millón (bajo normalidad). Por esta razón se dice que:

- Si  $C_p < 1 \rightarrow$  el proceso no es capaz
- Si  $C_p > 1.33 \rightarrow$  el proceso es capaz
- Si  $1 < C_p < 1.33 \rightarrow$  el proceso es capaz, pero requiere un seguimiento muy estricto.

El  $C_{pk}$  es definido como el índice de capacidad real continua del proceso. Es la relación entre la menor distancia del centro de la distribución (posición del proceso) al límite del campo de tolerancia más próximo, dividida por la mitad de la dispersión del proceso ( $3\sigma$ ). El  $C_{pk}$  es igual al  $C_p$  si el proceso está centrado. Si hay desviación del centro del proceso respecto al centro del campo de tolerancias,  $C_{pk}$  resultará inferior a  $C_p$ .

El  $C_{pk}$  ha sido un índice para medir la capacidad de un proceso usado por muchos años. Éste índice utiliza solamente un estimador de sigma para medir la variación. Mientras este estimador sea aceptable, el estimador de sigma puede ser modificado artificialmente para hacerlo más bajo dependiendo del tamaño del subgrupo, intervalo del muestreo, o la planeación del muestreo.

- Si  $C_{pk} = 1$ , se puede decir que nuestro proceso es capaz de producir 99.73% dentro de especificaciones ya que se tiene una calidad de 3 sigma.



- Si  $C_{pk} > 1$ , se puede decir que nuestro proceso es capaz de producir cuando menos 99.73% de producto dentro de especificaciones.
- Si  $C_{pk} = 1.33$  se dice que tenemos una calidad de 4 sigma y nuestro proceso es capaz de producir 99.99% de producto dentro de especificaciones.
- Si  $C_{pk} = 2$ , se dice que tenemos una calidad de 6 sigma y nuestro proceso es capaz de producir 99.99999% de producto dentro de especificaciones (Verdoy et al., 2006).

### **2.5.5 Diseño de experimentos**

Los experimentos que se realizan hoy en día por muchas empresas manufactureras permiten aumentar nuestro entendimiento y conocimiento sobre varios procesos (Jiju, 2014).

Se entiende el Diseño de Experimentos como una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación. Más técnicamente, consiste en realizar una serie de pruebas en las que inducen cambios deliberados en las variables de un proceso de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida elegida (Tanco, 2008).

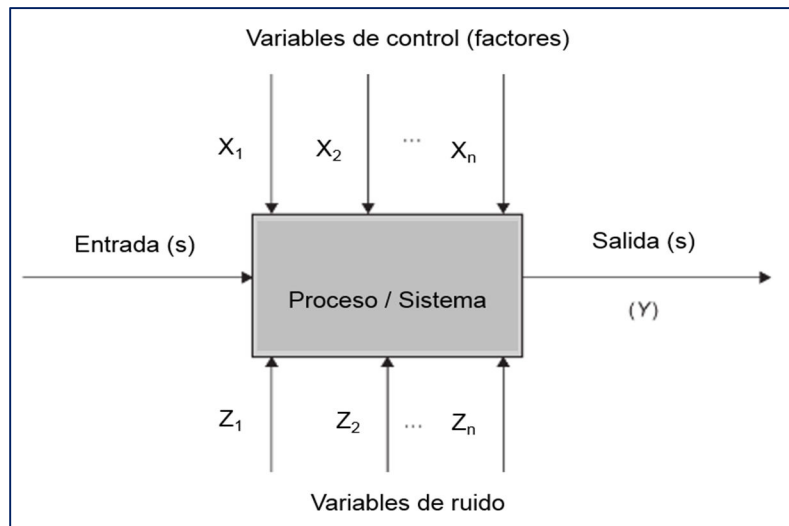
Las aplicaciones potenciales del DOE en los procesos de manufactura incluyen:

- Mejorar el rendimiento de los procesos y su estabilidad
- Mejorar ganancias y retorno de inversión
- Mejorar la capacidad de proceso
- Reducir la variabilidad de proceso y por lo tanto un producto más consistente
- Reducir costos de manufactura
- Reducir el diseño de proceso y el tiempo de desarrollo
- Aumentar la moral del ingeniero con el éxito en la resolución de problemas crónicos

- Incrementar la comprensión de la relación entre las entradas y salidas claves del proceso
- Incrementar las ganancias del negocio mediante la reducción de la proporción de desechos, defectos, retrabajo, etc.

Con el fin de entender adecuadamente un diseño de experimentos es esencial tener una buena comprensión del proceso. Un proceso es la transformación de entradas en salidas. En el contexto de manufactura, las entradas son factores o variables de proceso tal como personas, materiales, métodos, ambiente, máquinas, procedimientos, etc. Algunas veces, una salida puede ser referida como una respuesta.

La Figura 2-14 muestra el esquema general de un proceso o sistema, en el cual las salidas son características que se miden para evaluar el desempeño de un producto o proceso. Las variables de control (representadas por X's) pueden variar durante un experimento y estas variables juegan un papel clave en la caracterización del proceso.



**Figura 2-14 Esquema general de un proceso o sistema (Jiju, 2014)**

Las variables de ruido (representadas por Z's) son variables difíciles de controlar durante el experimento. Estas variables o factores son responsables de la

variabilidad en el rendimiento de un producto o de las inconsistencias del mismo. Es importante determinar los ajustes óptimos de X's con el fin de minimizar los efectos de Z's (Jiju, 2014).

### **2.5.6 Componentes del diseño experimental**

- **Factor.** Es una variable de interés controlada hasta cierto punto por el experimentador, de la que se desea estudiar sus efectos en una o varias respuestas. Los factores pueden ser concebidos como cualitativos o cuantitativos.
- **Nivel.** Modalidad específica dentro de un factor. Ejemplo: si el factor es el tiempo de operación, el interés puede ser estudiar la respuesta del proceso durante tres periodos diferentes, a saber 10, 30 y 50 segundos. En este caso se dice que el factor tiene tres niveles.
- **Tratamiento.** Se refiere a cada una de las combinaciones de los niveles de varios factores aplicados conjuntamente a las unidades experimentales.
- **Estructura de tratamientos de un diseño experimental.** Consiste en el conjunto de tratamientos que el experimentador ha seleccionado para estudiar y/o comparar. Puede haber estructuras con un factor (OFAT) o varios factores; pueden considerarse todos los tratamientos (diseño factorial) o un subconjunto del total de tratamientos según el interés (diseño factorial incompleto).
- **Efecto Principal.** Indica la contribución que cada factor tiene sobre las variables respuesta. Ésta se mide evaluando el cambio que se produce en la respuesta al modificar los niveles del factor. Los efectos se pueden clasificar en efectos de localización (sobre la media de una variable respuesta) y efectos de dispersión (sobre la variabilidad de una variable respuesta).

- Efecto de interacción. Considerando los efectos sobre las variables respuesta bajo estudio, la interacción implica una relación o dependencia entre los efectos de dos o más factores; por ejemplo, para el caso de dos factores, si hay interacción entre éstos, el efecto sobre la respuesta de uno de ellos dependerá del nivel del segundo factor (Tostado y Dominguez, 2001).

### **2.5.7 Principios del diseño de experimentos**

Los tres principios del diseño experimental llamados aleatorización, réplicas y bloqueo, pueden ser utilizados en experimentos industriales para mejorar la eficiencia de la experimentación. Estos principios son aplicados para reducir o incluso eliminar el sesgo en la experimentación.

- Aleatorización. Mientras se diseñan experimentos industriales, existen factores, tales como las sobretensiones, errores de operación, fluctuaciones de la humedad y temperatura ambiente, variaciones de materia prima, etc., los cuales influyen en el rendimiento de la salida del proceso debido a que son costosos o difíciles de controlar. La aleatorización es uno de los métodos que usan los experimentadores para reducir el efecto del sesgo experimental. El propósito de la aleatorización es eliminar todas las fuentes externas de variación las cuales no son controlables en la configuración real. Aleatorizando el experimento de manera adecuada, ayudamos a promediar los efectos de los factores de ruido que puedan estar presentes en el proceso.
- Réplicas. Consiste en realizar corridas experimentales de manera aleatoria. Las réplicas son repeticiones de un experimento completo o de una parte del mismo, bajo más de una condición. Por ello tiene tres propiedades importantes:
  - Permite al experimentador obtener una medición más exacta del error experimental, un término que representa las diferencias que

observaríamos si fueran aplicadas las mismas condiciones experimentales varias veces a las mismas unidades experimentales.

- Permite al experimentador obtener un estimado más preciso del efecto del factor o interacción.
- Puede disminuir el error experimental y por lo tanto incrementar la precisión.

Si el número de réplicas es igual a uno o a la unidad no seríamos capaces de obtener conclusiones satisfactorias acerca del efecto de las interacciones o de los factores.

- Bloqueo. Es un método para eliminar los efectos de la variación inusual debida a los factores de ruido y de este modo se mejora la eficiencia del diseño experimental. El objetivo principal es eliminar fuentes indeseables de variación tal como lote a lote, día a día, turno a turno, etc. La idea es organizar corridas experimentales similares u homogéneas en grupos o bloques (Jiju, 2014).

### **2.5.8 Etapas en el diseño de experimentos**

El arreglo formado por los diferentes tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones, recibe el nombre de matriz de diseño o sólo diseño. Para que un estudio experimental sea exitoso es necesario realizar, por etapas, diferentes actividades (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

Los experimentos industriales involucran una secuencia de actividades:

- Hipótesis: Una suposición que motiva al experimento.
- Experimento: Una serie de pruebas dirigidas a la investigación de la hipótesis.
- Análisis: La comprensión de la naturaleza de los datos y realización de análisis estadísticos de los datos obtenidos del experimento.
- Interpretación: La comprensión de los resultados del análisis experimental.

- **Conclusión:** Indicar si la hipótesis original es verdadera o falsa. La mayoría de las veces se tienen que realizar más experimentos para probar la hipótesis y algunas veces se establece una nueva hipótesis que requiere más experimentos (Jiju, 2014).

#### **2.5.8.1 Planeación y realización**

- Entender y delimitar el problema u objeto de estudio. En esta etapa se deben hacer investigaciones preliminares que conduzcan a entender y delimitar el problema u objeto de estudio, de tal forma que quede claro qué se va a estudiar, por qué es importante y, si es un problema, cuál es la magnitud del mismo.
- Elegir la(s) variable(s) de respuesta que será medida en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable. Por ello, se deben elegir aquellas que mejor reflejen el problema o que caractericen al objeto de estudio. Además, se debe tener confianza en mayor efecto.
- Seleccionar los niveles de cada factor, así como el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento. Implica determinar cuántas repeticiones se harán para cada tratamiento, tomando en cuenta el tiempo, el costo y la precisión deseada.
- Planear y organizar el trabajo experimental. Con base en el diseño seleccionado, organizar y planear con detalle el trabajo experimental.
- Realizar el experimento. Seguir al pie de la letra el plan previsto en la etapa anterior, y en caso de algún imprevisto, determinar a qué persona se le reportaría y lo que se haría.

### **2.5.8.2 Análisis**

En esta etapa no se debe perder de vista que los resultados experimentales son observaciones muestrales, no poblacionales. Por ello, se debe recurrir a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos experimentales son lo suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales. La técnica estadística central en el análisis de los experimentos es el llamado análisis de varianza ANOVA.

### **2.5.8.3 Interpretación**

Mediante el respaldo del análisis estadístico, se debe analizar con detalle lo que ha pasado en el experimento, desde contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron, verificar supuestos y elegir el tratamiento ganador, siempre con apoyo de las pruebas estadísticas.

### **2.5.8.4 Conclusiones**

Para concluir el estudio experimental se recomienda decidir qué medidas implementar para generalizar el resultado del estudio y para garantizar que las mejoras se mantengan. Además, es preciso organizar una presentación para difundir los logros.

## **2.5.9 Clasificación de los diseños de experimentos**

En la Figura 2-15, se muestra la clasificación de los diseños de experimentos de acuerdo con su objetivo.

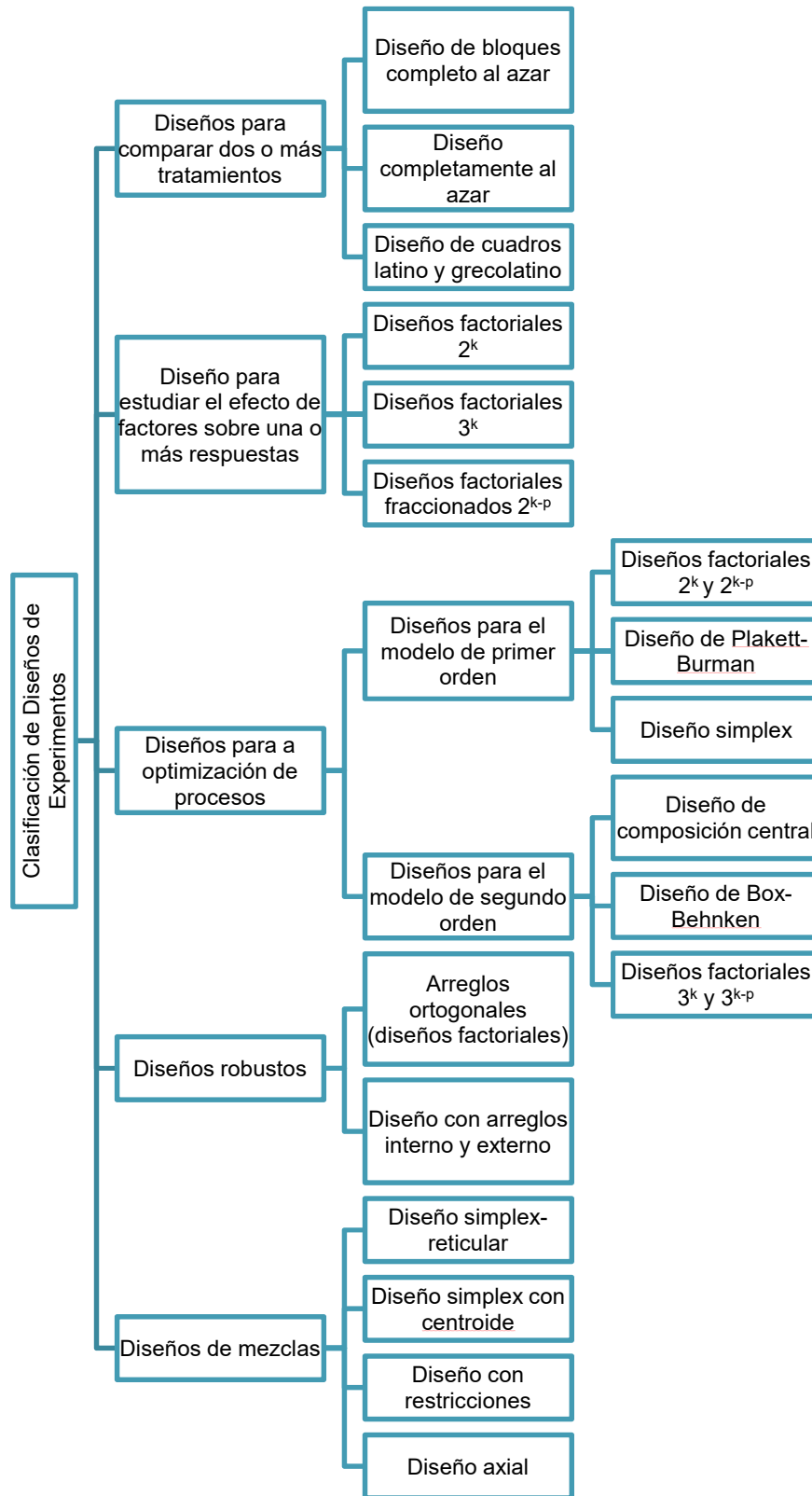


Figura 2-15 Clasificación de los diseños experimentales (Gutiérrez and De la Vara, 2008)



### 2.5.10 Diseño Factorial Fraccionado

Los diseños factoriales fraccionados permiten sacrificar información poco importante en aras de un diseño manejable en cuanto al número de corridas experimentales. Las corridas en los diseños factoriales fraccionados son una fracción de los tratamientos de los diseños factoriales completos. La teoría de diseños fraccionados se basa en una jerarquización de los efectos: son más importantes los efectos principales, seguidos por las interacciones dobles, luego las triples, cuádruples, etcétera.

La notación  $2^{k-1}$  significa una fracción a la mitad del diseño factorial completo  $2^k$ ,  $k > 2$  con  $\frac{1}{2} 2^k = 2^{k-1}$ . En la Figura 2-16, se observa una representación de un diseño factorial fraccionado  $2^{3-1}$ .

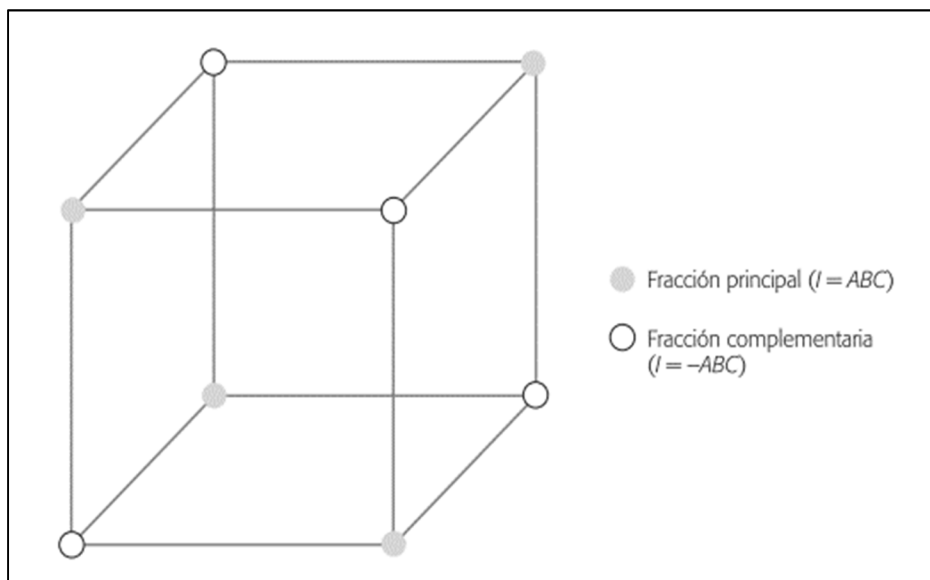


Figura 2-16 Representación de un diseño factorial fraccionado  $2^{3-1}$  (Gutiérrez y De la Vara, 2008)

Cabe aclarar que al correr sólo una fracción del diseño factorial completo ocurren dos hechos insoslayables:

1. Se pierde información, ya que habrá efectos que no podrán estimarse y se tienen menos grados de libertad disponibles para el error. Los efectos que se

pierden se espera que sean interacciones de alto orden, las cuales se pueden ignorar de antemano con bajo riesgo.

2. Los efectos que sí se pueden estimar tienen al menos un alias. El que un efecto sea alias de otro significa que en realidad son el mismo efecto con nombres distintos, y al estimar a uno de ellos al mismo tiempo se estima el otro, de manera que no se pueden separar (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

#### **2.5.10.1 Resolución de un diseño factorial fraccionado**

Un diseño factorial fraccionado es de resolución R si los efectos formados por la interacción de P factores, no son alias de efectos de interacción que tengan menos de R – P factores. En general, en los diseños factoriales fraccionados en dos niveles, la resolución está dada por la “palabra o efecto” de la relación definidora con el menor número de letras. Por ejemplo, en los diseños  $2^{k-1}$  la resolución es igual al número de letras del generador, ya que al mismo tiempo éste es la relación definidora.

Así, las fracciones  $2^{3-1}$ ,  $2^{4-1}$  y  $2^{5-1}$  tienen resolución III, IV y V, respectivamente, porque sus generadores correspondientes se componen de 3, 4 y 5 letras (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

#### **2.5.11 Diseño central compuesto**

Cuando en un diseño factorial  $2^k$  los k factores admitan un nivel de prueba intermedio, es recomendable implementar un tratamiento adicional formado por la combinación del nivel intermedio o medio de todos los factores. Esta combinación se le conoce como punto central.

El diseño central compuesto es el experimento diseñado de superficie de respuesta que más se utiliza. Los diseños centrales compuestos son un diseño factorial o factorial fraccionado con puntos centrales, ampliado con un grupo de

puntos axiales (también denominados puntos de estrella) que permiten estimar la curvatura. Puede utilizar un diseño central compuesto para:

- Estimar eficientemente los términos de primer orden y segundo orden.
- Modelar una variable de respuesta con curvatura al agregar puntos centrales y axiales a un diseño factorial previamente ejecutado.

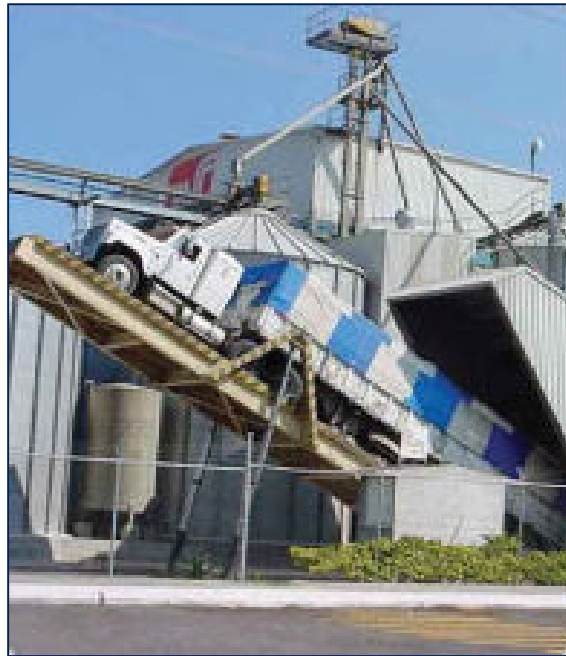
Los diseños centrales compuestos son especialmente útiles en los experimentos secuenciales, porque frecuentemente permiten ampliar experimentos factoriales anteriores al agregar puntos axiales y centrales (Gutiérrez y De la Vara, 2008)

### **3. METODOLOGÍA**

En el presente capítulo se describe de manera detallada la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto. Se especifican todos los elementos utilizados previos y durante la experimentación con el fin de cumplir el objetivo de esta tesis.

#### **3.1 Lugar**

El proyecto se llevó a cabo en la planta de producción Nueva Tecnología en Alimentación S.A de C.V. (Nutec Jean Claude Freulon), ubicada en Avenida De las Fuentes No. 14, Fraccionamiento Industrial Bernardo Quintana, El Marqués, Querétaro (Figura 3-1 y Figura 3-2).



**Figura 3-1 Planta Nueva Tecnología en Alimentación (Vista frontal).**



**Figura 3-2 Planta Nueva Tecnología en Alimentación (Vista posterior).**

### **3.2 Fórmula de alimento**

El diseño experimental se realizó utilizando una sola formulación de alimento desarrollada por Grupo Nutec, dicha fórmula está clasificada como un alimento súper premium para perros adultos. En la Tabla 3-1, se describen los ingredientes y proporciones nutricionales de la fórmula a utilizar.

<b>Ingredientes</b>	<b>Análisis garantizados</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Harina de carne.</li> <li>• Harina de pescado.</li> <li>• Subproductos de leche.</li> <li>• Harina de subproductos de ave.</li> <li>• Grasas de origen animal.</li> <li>• Grano de cereales: trigo, maíz, arroz.</li> <li>• Pastas de oleaginosas.</li> <li>• Concentrado de proteína vegetal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proteína Cruda. Mín. 24%</li> <li>• Grasa Cruda. Mín. 12%</li> <li>• Fibra Cruda. Max. 4%</li> <li>• Humedad. Max. 9%</li> <li>• Cenizas. Max. 8%</li> <li>• E.L.N. 43%</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulpa de remolacha.</li> <li>• Aminoácidos.</li> <li>• Minerales (calcio, fósforo, sodio, zinc, hierro, manganeso, cobre, yodo, selenio, cobalto).</li> <li>• Vitaminas (A, D, E, K y complejo B: Tiamina, Riboflavina, ácido pantoténico, piridoxina, ácido fólico, cianocobalamina, niacina, biotina).</li> <li>• Antioxidantes (BHA y BHT, para proteger el alimento).</li> </ul>	
---	--

**Tabla 3-1 Composición nutricional del alimento.**

### **3.3 Tolva de alimentación**

Los ingredientes se mezclaron y molieron previamente, asegurando un producto en harina uniforme. La tolva permitió el ingreso de la harina al pre-acondicionador como primer paso del proceso, con una tasa de alimentación de 4500 kg/h, la cual se mantuvo constante durante toda la experimentación.

### **3.4 Pre-acondicionador**

La harina se acondicionó mediante la entrada de agua y vapor por un tiempo de retención de 2.5 minutos. Las condiciones del pre-acondicionador que se muestran en la Tabla 3-2 se utilizaron en el diseño de experimentos y se mantuvieron constantes.

Factor	Valor
Velocidad pre-acondicionador	70 rpm
Vapor pre-acondicionador	590 Kg/h
Agua pre-acondicionador	550 Kg/h

**Tabla 3-2 Condiciones constantes del pre-acondicionador**

La temperatura de la harina a la salida del pre-acondicionador estuvo en un rango de 85-90°C. Este parámetro se midió con un termómetro digital de contacto marca Fluke modelo 51-II y una sonda de inmersión Fluke 80PK-22 (Figura 3-3).



**Figura 3-3 Termómetro Fluke con sonda de Inmersión**

### 3.5 Extrusor

El proyecto se realizó en un extrusor modelo BIVIS BC92 NS AA ubicado en la línea de producción Mascotas 3 de la empresa Nutec JCF, marca Clestral. En la Figura 3-4 se identifican las partes del extrusor, las cuales se mencionan a continuación:

- a) Chasis
- b) Motor del tornillo
- c) Acoplamiento limitador de par
- d) Grupo de arrastre
- e) Linterna
- f) Recámara
- g) Cajas eléctricas
- h) Pies de apoyo regulables
- i) Soporte de recámara
- j) Central de lubricación

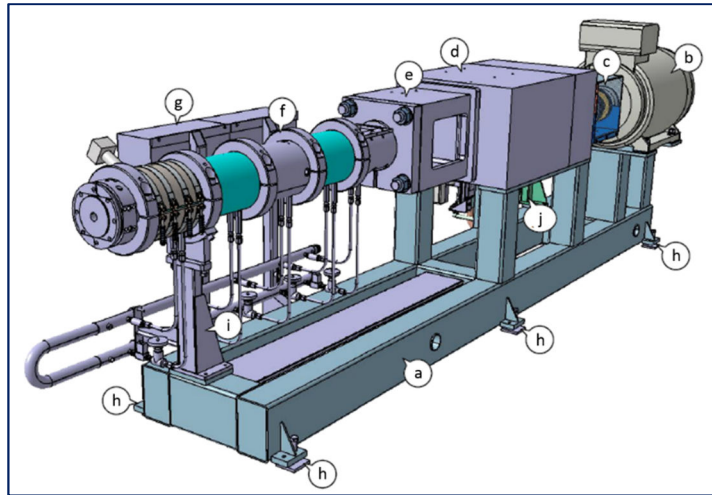
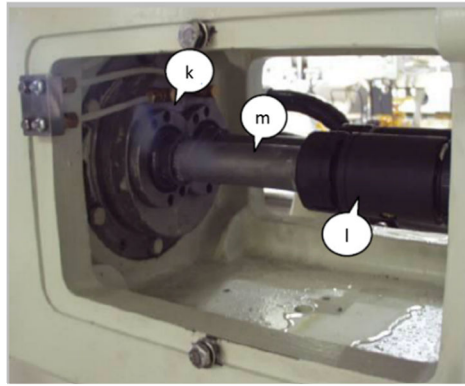


Figura 3-4 Diagrama del extrusor BIVIS BC92 NS AA (Manual Clextral)

En la Figura 3-5 se detallan las partes que componen la linterna, las cuales son:

- k) Cojinete de inserción
- l) Acoplamientos de los ejes de los husillos
- m) Eje de husillos

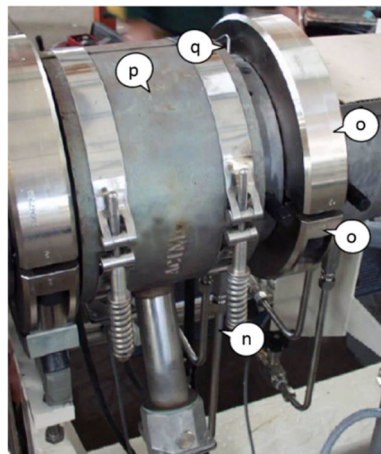




**Figura 3-5 Partes de la linterna (Manual Cextral)**

En la Figura 3-6 se muestran las partes que conforman a las recámaras del extrusor, las cuales son:

- n) Detalle de la recámara
- o) Abrazaderas de presión
- p) Abrazaderas con calentamiento
- q) Sondas de temperatura



**Figura 3-6 Partes de las recámaras (Manual Clextral)**

En la Figura 3-7 se muestran las piezas que componen el sistema de enfriamiento, las cuales se mencionan a continuación:

- r) Circuito de tuberías
- s) Circuito de colectores
- t) Válvulas de aislamiento

- u) Electroválvulas
- v) Válvulas anti-retorno

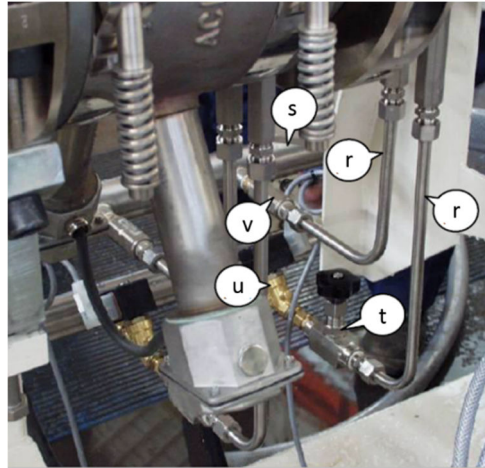


Figura 3-7 Partes del sistema de enfriamiento (Manual Clextral)

### 3.5.1 Monitor de operación

La Figura 3-8 muestra la pantalla de control que facilita la manipulación del extrusor y las unidades principales. Mediante esta pantalla táctil se modificaron las condiciones de los diferentes tratamientos aplicados durante la experimentación.

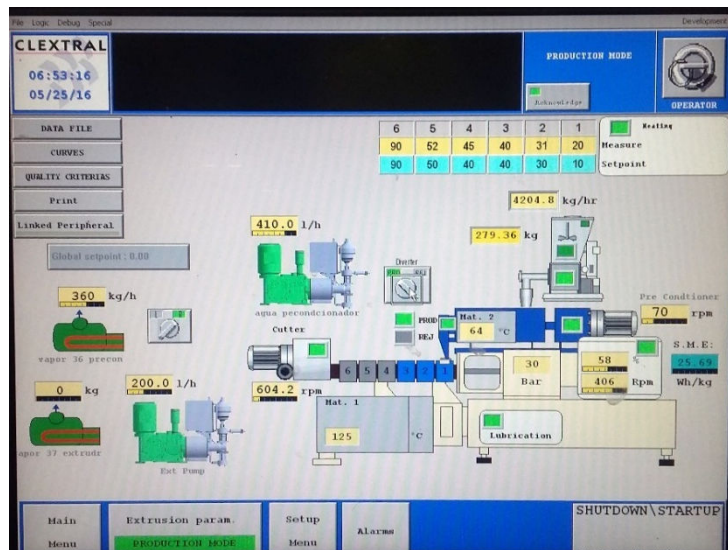


Figura 3-8 Pantalla de visualización de proceso

### **3.6 Métodos analíticos**

#### **3.6.1 Determinación de cocción de almidón**

Mediante esta técnica se realizó la determinación del grado de almidón gelatinizado o cocción de almidón en las muestras de alimento extruido.

##### **3.6.1.1 Materiales y reactivos**

- Matraces Erlenmeyer de 125 ml
- Matraces volumétricos de 100 ml
- Balanza analítica
- Espátula
- Probetas graduadas de 25 ml
- Plato caliente
- Papel aluminio
- Autoclave
- Micropipeta (1 a 10 ml)
- Micropipeta (20 – 200  $\mu$ l)
- Termobañó
- Cronometro
- Pipetas Pasteur
- Papel filtro plisado
- Agua destilada

- Amiloglucosidasa Megazyme Kit
- Buffer de acetato pH 4,2
- Ácido tricloroacético
- Hidróxido de Sodio (NaOH) 2N
- Ácido Clorhídrico (HCl) 2N

### **3.6.1.2 Preparación de soluciones**

- Buffer de acetato de sodio 1N (pH 4.2): Se disolvieron 18.2 g de acetato de sodio anhidro en 300 mL de agua destilada en un matraz volumétrico de 1 L. Se agregaron 44.6 mL de ácido acético glacial. Se ajustó el pH a 4.2 con HCl 2N o NaOH 2N y se aforó con agua destilada.
- Hidróxido de sodio 2N: Se pesaron 41.24 g de NaOH (97% de pureza) y se colocaron en un matraz aforado de 500 mL; se disolvió con agua destilada y se aforó.
- Ácido tricloroacético al 25%: Se disolvieron 333.3 g de ácido tricloroacético en 1000 mL de agua destilada.
- Ácido clorhídrico 2N: Se colocaron 250 mL de agua destilada en un matraz aforado de 500 mL y se agregaron 83.44 de HCl (37.07% de pureza), se disolvió y aforó.

### **3.6.1.3 Preparación de la muestra**

- Las muestras se molieron con una malla de 0.5 mm mediante el molino Retsch ZM 200 que se muestra en la Figura 3-9.



**Figura 3-9 Molino Retsch ZM 200**

- Se pesaron  $0.50 \pm 0.0090$  g de la muestra por triplicado (Figura 3-10); una de las muestras se pesó en un matraz Erlenmeyer de 125 ml (A) y la otra en matraz aforado de 100 ml (B).



**Figura 3-10 Pesaje de muestras**

**Nota:** Las muestras contenidas en los matraces Erlenmeyer serán utilizadas para determinar el contenido de almidón total; las muestras pesadas en los matraces volumétricos de 100 mL serán utilizadas para determinar el contenido de almidón gelatinizado.

- A los matraces volumétricos y Erlenmeyer se les agregaron 25 mL de agua destilada.

#### 3.6.1.4 Proceso de solubilización físico

Las muestras contenidas en los matraces Erlenmeyer se calentaron de 3-5 minutos a una temperatura de 220°C en placa (Figura 3-11). Posteriormente los matraces se cubrieron con papel aluminio y se sometieron a tratamiento con presión y alta temperatura en la autoclave durante 1 hora a 15 psi (Figura 3-12).



**Figura 3-11 Muestras en calentamiento**



**Figura 3-12 Muestras a introducir al autoclave**

### 3.6.1.5 Proceso de digestión enzimática

- A las muestras contenidas en los matraces aforados (B) y los matraces Erlenmeyer (A) se les agregó 10 mL del buffer de acetato (pH 4.2).
- Se adicionaron 200  $\mu\text{L}$  de *Amiloglucosidasa* a cada uno de los matraces y se incubaron a  $40\pm 2^\circ\text{C}$  en el termobañó con agitación constante durante 1.10 horas como se muestra en la Figura 3-13.



Figura 3-13 Adición de enzima e incubación de muestras

- Después de la incubación se adicionaron inmediatamente 5 ml de la solución de ácido tricloroacético al 25% para detener la hidrólisis. Los matraces se dejaron enfriar a temperatura ambiente.
- Las muestras contenidas en los matraces Erlenmeyer (A) se trasvasaron a matraces aforados de 100 mL evitando que quedaran residuos sobre las paredes; posteriormente se aforó la totalidad de matraces volumétricos (Figura 3-14).



**Figura 3-14 Muestras aforadas a 100mL**

- Las muestras contenidas en los matraces volumétricos se filtraron con papel filtro plisado 2V.

### 3.6.1.6 Lectura de muestras

- Se prepararon dos celdas por muestra tal como se muestra en la Tabla 3-3:

	Blanco	Muestra
Solución Buffer	1mL	1mL
Muestra	-----	0.1mL
Agua destilada	2mL	1.9mL

**Tabla 3-3 Preparación de muestras para su lectura en el UV**

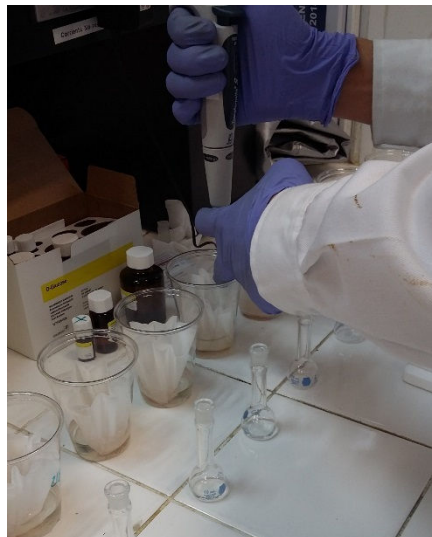
- Las muestras se agitaron y reposaron durante 3 minutos; previo a la lectura se agitaron nuevamente y se leyó la absorbancia en el Espectrofotómetro UV (Figura 3-15) a 340nm, este dato se registró como ABS 1.





**Figura 3-15 Espectrofotómetro UV**

- Posteriormente se agregaron 0.02mL de enzima tanto al blanco como a las muestras (Figura 3-16).



**Figura 3-16 Adición de enzima**

- Las muestras se agitaron y se dejaron reposar durante 15 minutos; después se agitaron nuevamente y se leyeron a 340nm en el Espectrofotómetro UV, este dato se registró como ABS 2.

### 3.6.1.7 Cálculos

$$\Delta A_{Mtra} = ABS2_{Mtra} - ABS1_{Mtra}$$

$$\Delta A_{Bco} = ABS2_{Bco} - ABS1_{Bco}$$

$$\Delta A = \Delta A_{Mtra} - \Delta A_{Bco}$$

$$G = \Delta A * 0.92$$

$$\% \text{ Almidón Gelatinizado} = \frac{G * V * 0.9 * FD}{10 * W}$$

Dónde:

**FD** = Factor de Dilución

**W** = Peso de muestra

**V**= Volumen del Matraz utilizado

### 3.6.2 Determinación de peso específico

Se determinó el peso contenido en un litro de las muestras obtenidas en la experimentación.

#### 3.6.2.1 Materiales y equipo

- Recipiente metálico cilíndrico de 1 litro (bronce o acero inoxidable).

- Balanza 0.1 g
- Tira de madera (30 cm x 5 cm x 3 mm)
- Tolva alimentadora de latón con compuerta (abertura de 31.75mm)

### 3.6.2.2 Procedimiento

- Se taró en la balanza el recipiente metálico de 1 litro.
- Se colocó la tolva permanentemente sobre el recipiente metálico cilíndrico y se llenó con las muestras de alimento a probar.
- Se abrió la compuerta para que la muestra cayera libremente en el recipiente cilíndrico, inmediatamente se rasó con la tira de madera, sin comprimir el material, evitando que se golpeará el recipiente y se pesó.
- El peso que se obtuvo en la balanza es el resultado de peso específico en g/L del material analizado.
- El proceso completo se ilustra en la Figura 3-17.



Figura 3-17 Determinación de peso específico en extruidos

### 3.6.3 Determinación de las dimensiones (Grosor y corte)

Se realizaron las mediciones de grosor y corte de las croquetas a salida del extrusor como medida de calidad a través de un Vernier digital marca Mitutoyo como el que se muestra en la Figura 3-18.



Figura 3-18 Vernier digital Mitutoyo

Se realizó la medición del corte como lo muestra la Figura 3-19, además de la medición del grosor como se observa en la Figura 3-20, ya que es una característica de calidad a salida del extrusor.



Figura 3-19 Medición del corte de la croqueta



Figura 3-20 Medición del grosor de la croqueta

### 3.7 Desarrollo del proyecto

#### 3.7.1 Definición de las variables de proceso

Con base a la literatura y a la experiencia del personal que labora en la empresa, y teniendo como objetivo del proyecto aumentar el porcentaje de cocción del almidón, a través de la estandarización del proceso de extrusión de los alimentos para mascotas; se definió que las variables que influían sobre la respuesta eran el agua, vapor, velocidad del motor del extrusor y el delta entre las temperaturas de las recámaras.

Los factores de ruido fueron las condiciones ambientales, ya que en la planta no se podían controlar. La respuesta fue el porcentaje de cocción de almidón en el producto a la salida del extrusor. Dichas variables se pueden observar en la Figura 3-21.

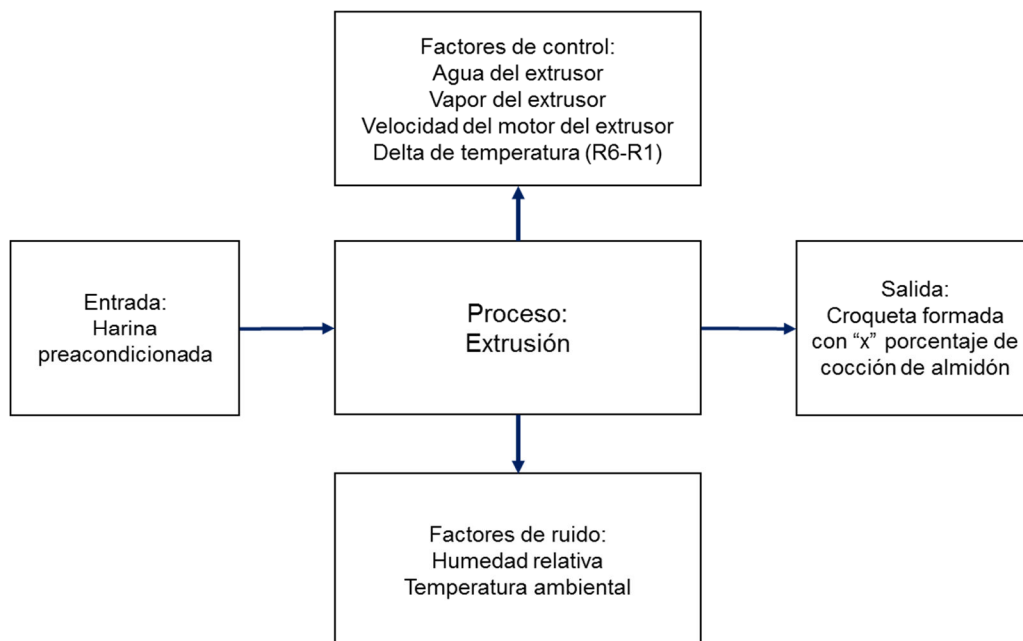


Figura 3-21 Diagrama de bloques proceso extrusión

Una vez identificadas las variables se estableció modelo matemático que se describe en la ecuación 1 y 2.

$$y \sim \text{Temperatura} + \text{Agua} + \text{Vapor} + \text{Velocidad del motor} + \varepsilon \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \varepsilon \quad (2)$$

Donde  $y$  = % de cocción de almidón

Con base en el diagrama de bloques se generó las hipótesis y los objetivos de esta tesis, presentados en el capítulo 1.

### 3.7.2 Análisis del sistema de medición

Se realizó un estudio del sistema de medición para evaluar su repetibilidad y reproducibilidad, con el fin de conocer si la variabilidad del método era aceptable.

#### 3.7.2.1 Análisis R y R para peso específico

Se seleccionaron 10 muestras al azar de producto terminado y se solicitó a dos analistas que determinaran el peso específico de cada muestra por triplicado, los resultados se muestran en la Tabla 3-4.

Analista	Muestra	Peso Específico (g/L)	Analista	Muestra	Peso Específico (g/L)
1	1	371.82	2	1	375.42
1	1	365.86	2	1	361.04
1	1	375.60	2	1	376.24
1	2	373.48	2	2	377.14
1	2	366.84	2	2	366.10
1	2	372.66	2	2	370.90
1	3	397.32	2	3	405.98
1	3	399.20	2	3	396.58
1	3	401.50	2	3	398.62
1	4	374.26	2	4	372.48
1	4	370.00	2	4	369.40
1	4	371.87	2	4	373.18
1	5	384.00	2	5	385.86
1	5	376.28	2	5	376.06
1	5	373.92	2	5	375.66
1	6	398.18	2	6	403.68
1	6	399.34	2	6	407.95

1	6	401.07	2	6	404.26
1	7	388.06	2	7	398.70
1	7	385.97	2	7	395.10
1	7	391.58	2	7	385.04
1	8	413.14	2	8	423.06
1	8	413.60	2	8	414.48
1	8	415.62	2	8	415.80
1	9	393.70	2	9	389.28
1	9	395.92	2	9	390.30
1	9	395.70	2	9	390.72
1	10	399.00	2	10	390.78
1	10	394.67	2	10	401.20
1	10	404.80	2	10	398.30

**Tabla 3-4 Datos de peso específico**

Los resultados obtenidos mediante el software Minitab 15, mostraron que, en el ANOVA (Figura 3-22), tanto la interacción como el analista no eran factores significativos; siendo el valor p de la interacción igual a 0.601, el modelo se simplificó eliminando este factor. En el nuevo modelo se observó que el analista era un factor no significativo, por lo que se concluyó que la variación se debía a las muestras.

<b>Tabla ANOVA de dos factores con interacción</b>						
Fuente	GL	SC	MC	F	P	
Muestra	9	12993.6	1443.73	91.4502	0.000	
Analista	1	9.9	9.88	0.6260	0.449	
Muestra * Analista	9	142.1	15.79	0.8199	0.601	
Repetibilidad	40	770.2	19.25			
Total	59	13915.7				
Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25						
<b>Tabla ANOVA dos factores sin interacción</b>						
Fuente	GL	SC	MC	F	P	
Muestra	9	12993.6	1443.73	77.5484	0.000	
Analista	1	9.9	9.88	0.5308	0.470	
Repetibilidad	49	912.2	18.62			
Total	59	13915.7				

**Figura 3-22 ANOVA para peso específico**

Del estudio R y R (Figura 3-23) se observó que el porcentaje de contribución total fue de 7.27%, además el porcentaje de variación fue de 26.96%, de acuerdo al AIAG, un valor de porcentaje de contribución entre 1-10% y un porcentaje de variación entre 10 y 30% describen a un sistema de medición aceptable. Esto, además, confirmado por el número de categorías distintas, que para el peso específico resultó igual a 5.

<b>R&amp;R del sistema de medición</b>			
Fuente		VarComp	%Contribución (de VarComp)
R&R del sistema de medición	total	18.617	7.27
Repetibilidad		18.617	7.27
Reproducibilidad		0.000	0.00
Analista		0.000	0.00
Parte a parte		237.520	92.73
Variación total		256.137	100.00
Fuente		Desv.Est. (DE)	Var. de estudio (6 * SD)
R&R del sistema de medición	total	4.3148	25.8886
Repetibilidad		4.3148	25.8886
Reproducibilidad		0.0000	0.0000
Analista		0.0000	0.0000
Parte a parte		15.4117	92.4700
Variación total		16.0043	96.0256
Fuente		%Var. de estudio (%SV)	
R&R del sistema de medición	total	26.96	
Repetibilidad		26.96	
Reproducibilidad		0.00	
Analista		0.00	
Parte a parte		96.30	
Variación total		100.00	
Número de categorías distintas = 5			

**Figura 3-23 Estudio R y R del sistema de medición para peso específico**

A continuación, se muestra el gráfico del R y R del sistema de medición (Figura 3-24) donde se pudo confirmar que el mayor porcentaje de contribución, así como variación del estudio es debido a las diferencias entre las muestras.

Otro aspecto importante que se pudo observar en los gráficos fue que el analista 2 presentó una mayor variación en sus resultados respecto del analista 1.



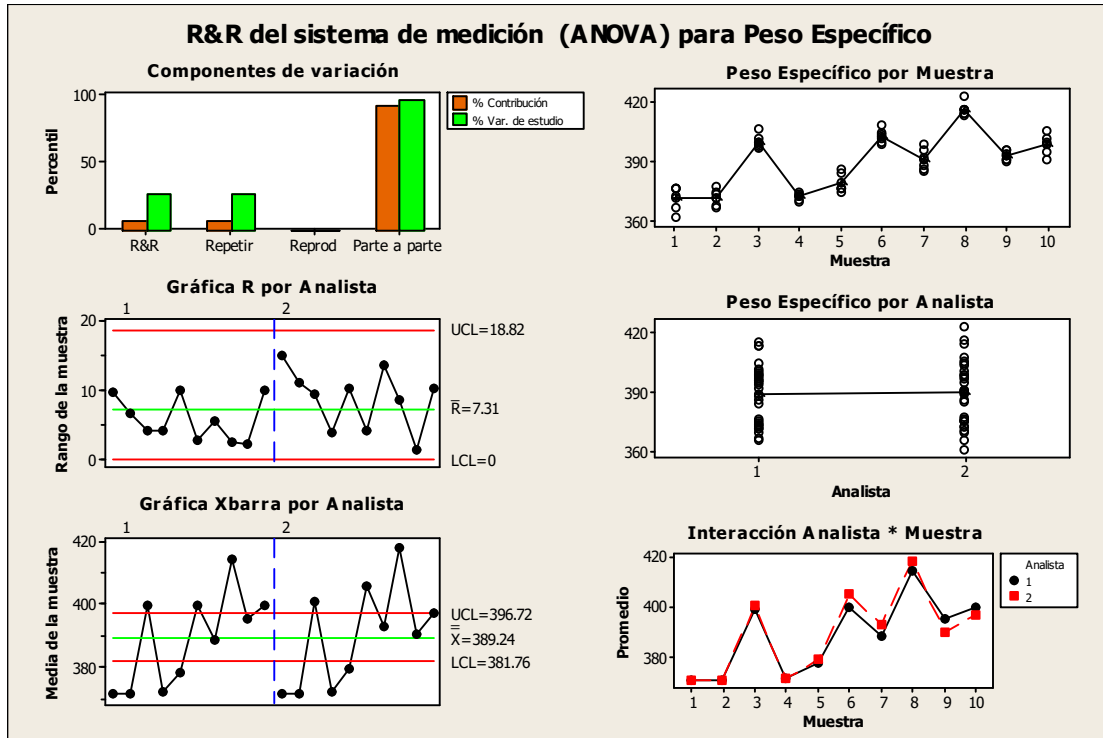


Figura 3-24 Gráficos del estudio R y R del sistema de medición para peso específico

### 3.7.2.2 Estudio R y R para determinación de dimensiones

La determinación de dimensiones tanto grosor como corte se realiza mediante un Vernier, por ello se seleccionó la dimensión denominada grosor para realizar este estudio. Se eligieron 10 muestras aleatoriamente y se solicitó a dos analistas que realizaran la determinación por triplicado, los datos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3-5).

Analista	Muestra	Grosor (mm)	Analista	Muestra	Grosor (mm)
1	1	12.14	2	1	12.17
1	1	12.18	2	1	11.92
1	1	12.05	2	1	12.21
1	2	12.74	2	2	12.42
1	2	12.56	2	2	12.01
1	2	12.47	2	2	12.78
1	3	11.56	2	3	11.6
1	3	11.72	2	3	11.69
1	3	11.47	2	3	11.74
1	4	11.66	2	4	11.54
1	4	11.71	2	4	11.79

1	4	11.44	2	4	11.44
1	5	12.14	2	5	12.26
1	5	12.37	2	5	12.07
1	5	12.58	2	5	12.65
1	6	12.97	2	6	13.55
1	6	13.28	2	6	13.36
1	6	12.92	2	6	13.21
1	7	12.84	2	7	12.69
1	7	13.04	2	7	13
1	7	12.97	2	7	13.13
1	8	13.31	2	8	13.25
1	8	13.1	2	8	13.35
1	8	13.16	2	8	13
1	9	13.6	2	9	13.64
1	9	13.45	2	9	13.33
1	9	13.23	2	9	13.21
1	10	13.06	2	10	13.14
1	10	13.27	2	10	12.99
1	10	13.18	2	10	13.21

**Tabla 3-5 Datos de grosor**

Los datos fueron analizados mediante el software Minitab 15, los resultados se muestran a continuación. En el ANOVA (Figura 3-25) se observó que la interacción no era significativa por lo que el modelo se simplificó quedando solo los efectos principales de los factores muestra y analista, donde se concluyó que el factor analista no fue significativo, es decir este factor no influyó sobre la variación de la medición.

<b>Tabla ANOVA de dos factores con interacción</b>					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Muestra	9	24.3707	2.70785	108.269	0.000
Analista	1	0.0005	0.00054	0.022	0.886
Muestra * Analista	9	0.2251	0.02501	0.728	0.680
Repetibilidad	40	1.3736	0.03434		
Total	59	25.9699			

Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25

<b>Tabla ANOVA dos factores sin interacción</b>					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Muestra	9	24.3707	2.70785	82.9957	0.000
Analista	1	0.0005	0.00054	0.0166	0.898
Repetibilidad	49	1.5987	0.03263		
Total	59	25.9699			

**Figura 3-25 ANOVA para grosor**

En la Figura 3-26, se observó que el porcentaje de contribución del R y R del sistema de medición total es de 6.82%, lo que, de acuerdo con el AIAG, indicó que el sistema de medición es aceptable. El porcentaje de variación del estudio es de 26.11% lo que nos llevó a la misma conclusión. El número de categorías igual a 5 indicó que el sistema es capaz de discernir las diferencias entre las muestras.

<b>R&amp;R del sistema de medición</b>			
Fuente	VarComp	%Contribución (de VarComp)	
R&R del sistema de medición total	0.032626	6.82	
Repetibilidad	0.032626	6.82	
Reproducibilidad	0.000000	0.00	
Analista	0.000000	0.00	
Parte a parte	0.445871	93.18	
Variación total	0.478497	100.00	
Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. de estudio (6 * SD)	
R&R del sistema de medición total	0.180628	1.08377	
Repetibilidad	0.180628	1.08377	
Reproducibilidad	0.000000	0.00000	
Analista	0.000000	0.00000	
Parte a parte	0.667736	4.00641	
Variación total	0.691735	4.15041	
Fuente	%Var. de estudio (%SV)		
R&R del sistema de medición total	26.11		
Repetibilidad	26.11		
Reproducibilidad	0.00		
Analista	0.00		
Parte a parte	96.53		
Variación total	100.00		
Número de categorías distintas = 5			

**Figura 3-26 Estudio R y R del sistema de medición para grosor**

En la Figura 3-27, de igual forma se observa que la mayor aportación de la variación se debió a las diferencias entre las muestras, lo que se confirma en la gráfica superior derecha, ya que la línea media no es recta, se pudo observar que la variación que tiene el analista 1 es similar a la que tiene el analista 2.

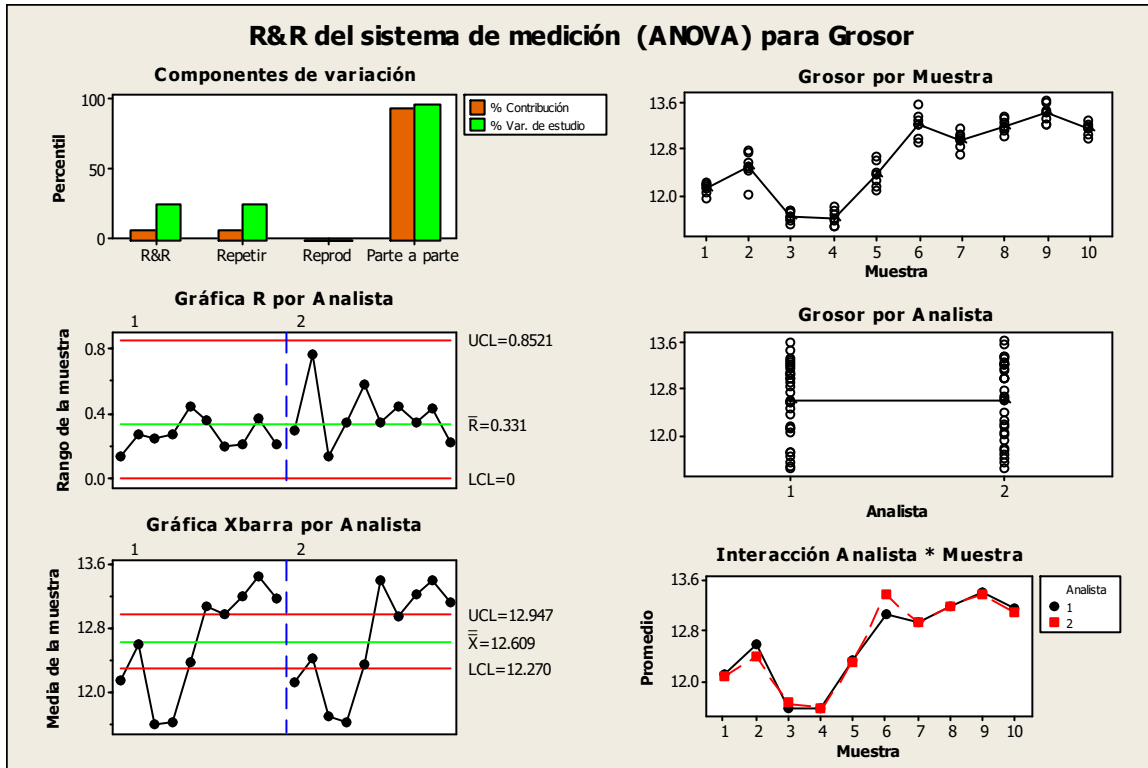


Figura 3-27 Gráficos del estudio R y R del sistema de medición para grosor

### 3.7.2.3 Estudio R y R para cocción de almidón

Se seleccionaron 10 muestras y se solicitó a dos analistas que realizaran la determinación del porcentaje de cocción del almidón, las muestras se determinaron por duplicado, los datos se muestran en la Tabla 3-6.

Analista	Muestra	%Cocción de almidón	Analista	Muestra	%Cocción de almidón
1	3917	14.68	2	3917	14.12
1	3917	14.55	2	3917	15.06
1	3919	14.66	2	3919	14.33
1	3919	13.47	2	3919	14.47
1	3931	15.23	2	3931	14.91
1	3931	14.94	2	3931	15.53
1	3981	21.85	2	3981	25.41
1	3981	24.72	2	3981	25.44
1	3890	17.13	2	3890	17.81

1	3890		18.61	2	3890	18.18
1	3901		80.77	2	3901	82.07
1	3901		81.96	2	3901	81.71
1	3925		78.11	2	3925	80.02
1	3925		78.94	2	3925	80.58
1	485		80.64	2	485	79.73
1	485		78.73	2	485	80.58
1	3924		89.22	2	3924	78.31
1	3924		91.38	2	3924	79.30
1	6948		80.48	2	6948	84.31
1	6948		82.58	2	6948	83.30

**Tabla 3-6 Datos de porcentaje de cocción de almidón**

El análisis se realizó mediante el software Minitab 15, los resultados se muestran a continuación.

<b>Tabla ANOVA de dos factores con interacción</b>					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Muestra	9	41802.8	4644.75	289.721	0.000
Analista	1	1.4	1.40	0.087	0.774
Muestra * Analista	9	144.3	16.03	20.452	0.000
Repetibilidad	20	15.7	0.78		
Total	39	41964.1			

Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25

**Figura 3-28 ANOVA para cocción de almidón**

De la tabla ANOVA (Figura 3-28) se observó que la muestra y la interacción son significativas, en este caso como los dos factores participan en la interacción ninguno de los dos, sean o no significativos, se pudieron eliminar. Sin embargo, se puede concluir que el factor Analista no es significativo, es decir este factor no influye sobre la variación del sistema de medición.

La Figura 3-29 muestra el estudio R y R del sistema de medición, en el cual se pudo observar que el porcentaje de contribución de la Parte-Parte fue de 99.28%, por lo que se concluyó que la variación del sistema era debido a las diferencias de las muestras, por su parte, el porcentaje de contribución del R y R del sistema de medición total, fue menor a 1%, por lo que se concluyó que el sistema de medición es aceptable.

<b>R&amp;R del sistema de medición</b>		
Fuente	VarComp	%Contribución (de VarComp)
R&R del sistema de medición total	8.41	0.72
Repetibilidad	0.78	0.07
Reproducibilidad	7.62	0.65
Analista	0.00	0.00
Analista*Muestra	7.62	0.65
Parte a parte	1157.18	99.28
Variación total	1165.59	100.00
Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. de estudio (6 * SD)
R&R del sistema de medición total	2.8996	17.398
Repetibilidad	0.8854	5.312
Reproducibilidad	2.7612	16.567
Analista	0.0000	0.000
Analista*Muestra	2.7612	16.567
Parte a parte	34.0173	204.104
Variación total	34.1407	204.844
Fuente	%Var. de estudio (%SV)	
R&R del sistema de medición total	8.49	
Repetibilidad	2.59	
Reproducibilidad	8.09	
Analista	0.00	
Analista*Muestra	8.09	
Parte a parte	99.64	
Variación total	100.00	
Número de categorías distintas = 16		

Figura 3-29 Estudio R y R para % de Cocción de Almidón

Se observó que el estudio R y R del sistema de medición total, es decir, la variación causada tanto por el sistema de medición como por las diferencias entre las piezas, representó el 8.49% de la variación del estudio; de acuerdo con el Grupo de Acción de la Industria Automotriz (AIAG), si este porcentaje es menor a 10%, tal como resultó en el estudio, el sistema de medición es aceptable.

El número de categorías resultantes fueron 16, lo que indicó nuevamente que el sistema de medición es aceptable, ya que se puede discernir entre las diferencias de las muestras, por lo que se habla de un sistema de medición preciso.

Las conclusiones a las que se llegó se pueden observar de manera gráfica en la Figura 3-30.

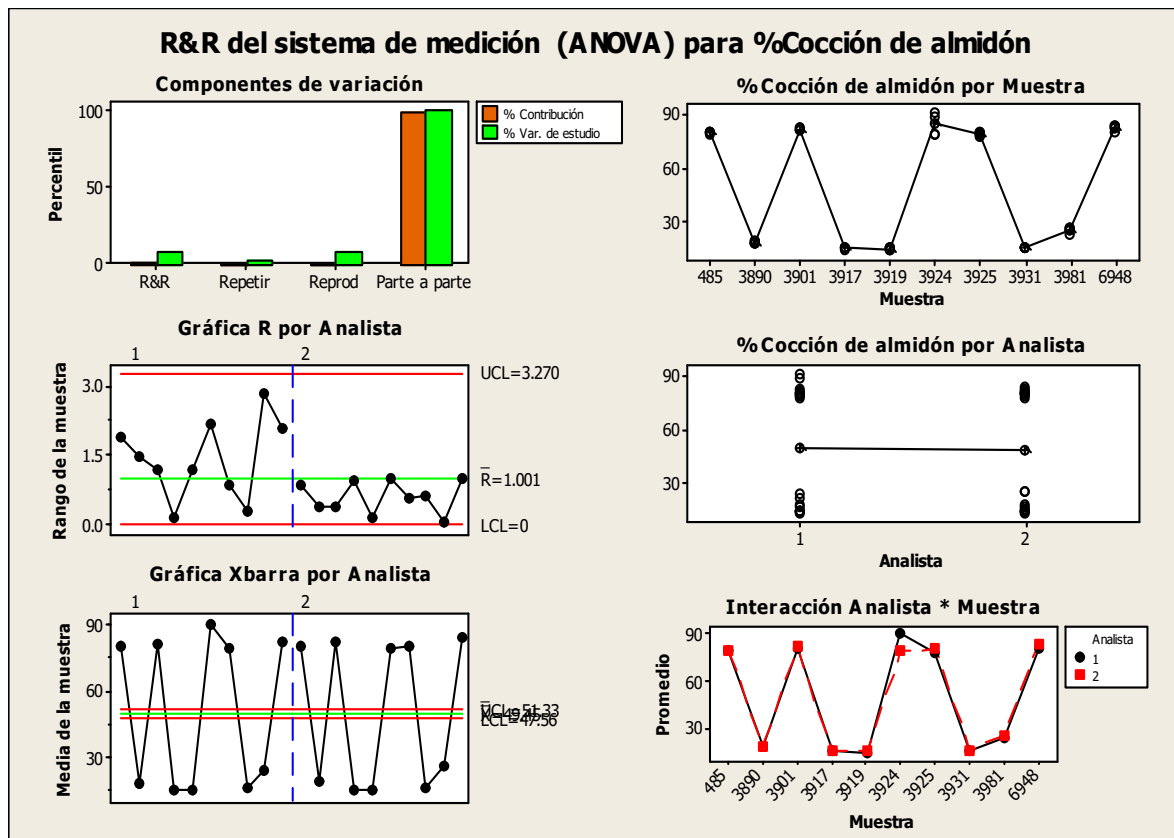


Figura 3-30 Gráficos del estudio R y R del sistema de medición para %Cocción de almidón

### 3.7.3 Análisis de estabilidad del proceso.

#### 3.7.3.1 Gráficos de control de variables para individuos

Con el fin de verificar la estabilidad de proceso, la información histórica de la línea Mascotas 3 generada durante siete meses se analizó mediante gráficos de control, para poder confirmar que no presentara causas especiales de variación. El peso específico fue la característica que se monitoreó a la salida del extrusor y para la cual se realizaron las cartas control.

Este análisis se realizó mediante el software Minitab cuyo gráfico de observaciones individuales se muestra a continuación (Figura 3-31).

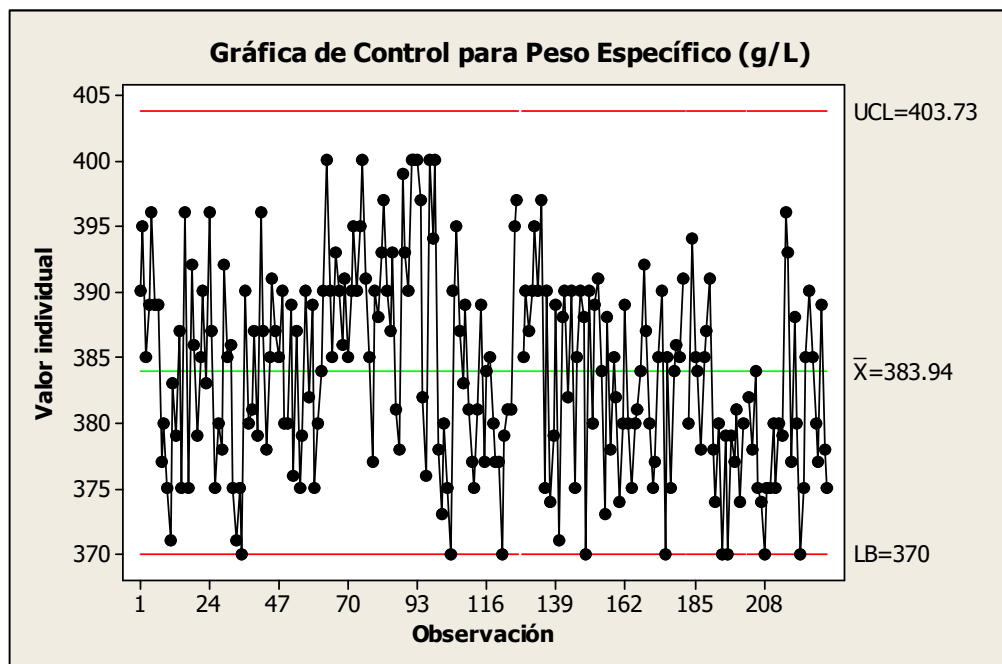


Figura 3-31 Gráfico de observaciones individuales para peso específico

Se observó que todos los datos recopilados para esta característica se encuentran dentro de los límites establecidos por especificación en un rango de 370g/L a 405g/L.



Se realizó también una gráfica de control de rango móvil (Figura 3-32), donde se observó que todos los datos estuvieron dentro de los límites de control y al igual que en la gráfica de datos individuales no se observa alguna tendencia de los mismos.

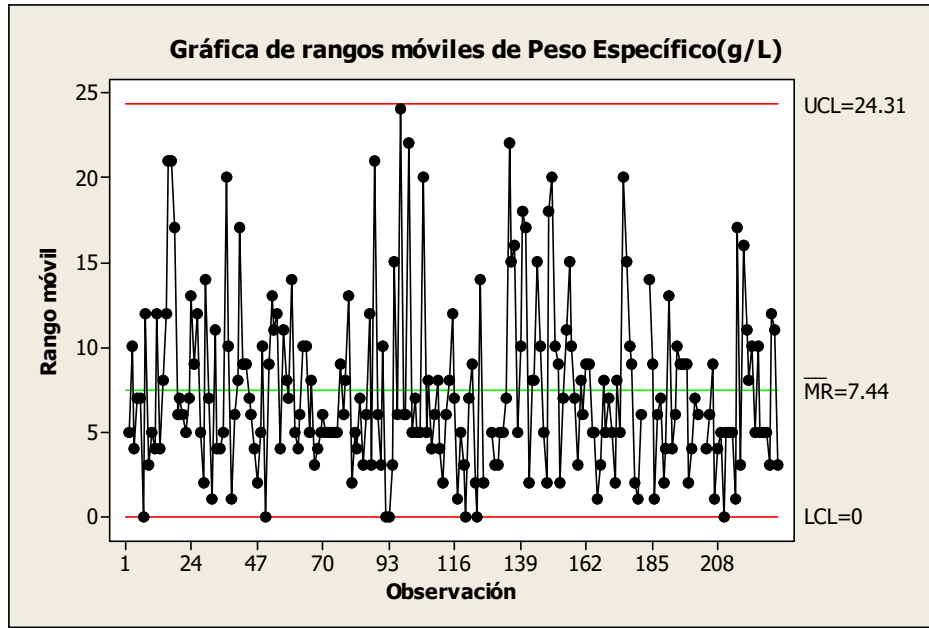


Figura 3-32 Gráfico de rango móvil para peso específico

Se concluyó que el proceso se encontraba bajo control y que la variación que presentaba a lo largo del tiempo es la natural del proceso ya que no existen tendencias marcadas en los datos o casusas especiales de variación.

### 3.7.3.2 Índice de capacidad de proceso Cp y Cpk

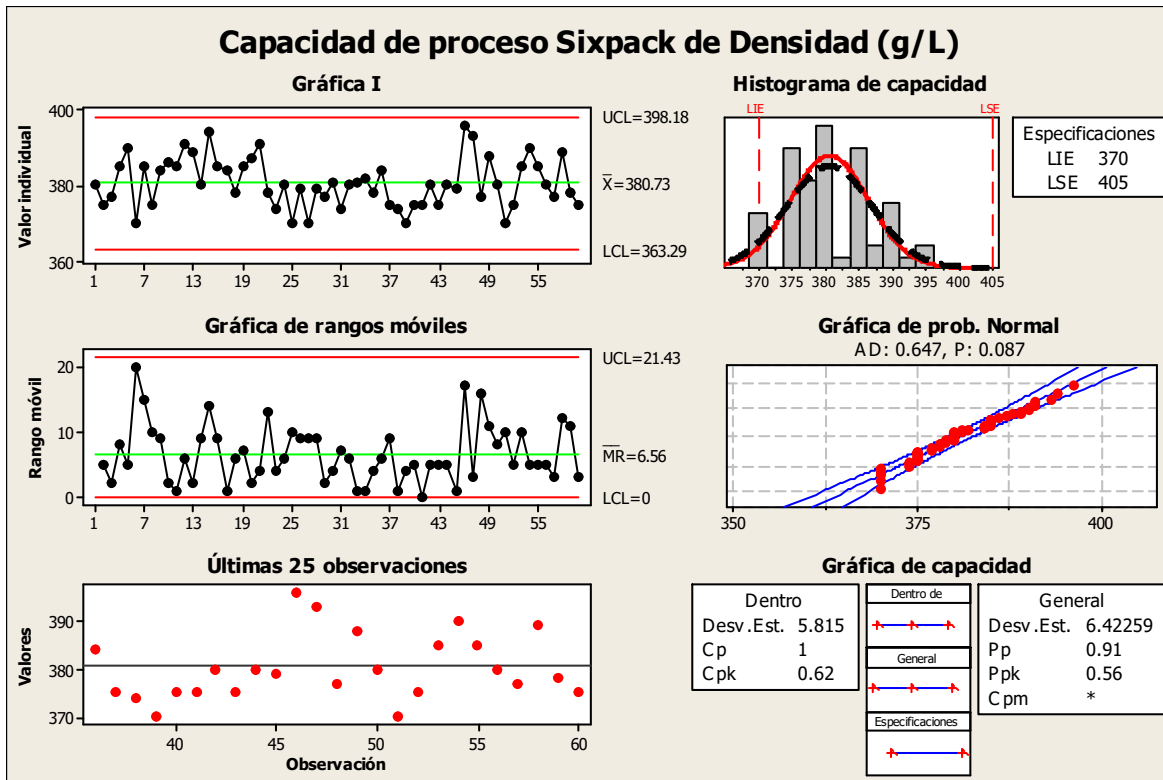
Con el objetivo de conocer si el proceso cumplía con las especificaciones deseadas y si estaba centrado, se realizó un estudio de la capacidad de proceso con la característica de peso específico, dónde el LIE= 370 g/L y el LSE= 405 g/L.

La Tabla 3-7 muestra los 60 datos que se utilizaron para realizar dicho análisis.

Muestra	Peso Específico (g/L)	Muestra	Peso Específico (g/L)
1	380	31	374
2	375	32	380
3	377	33	381
4	385	34	382
5	390	35	378
6	370	36	384
7	385	37	375
8	375	38	374
9	384	39	370
10	386	40	375
11	385	41	375
12	391	42	380
13	389	43	375
14	380	44	380
15	394	45	379
16	385	46	396
17	384	47	393
18	378	48	377
19	385	49	388
20	387	50	380
21	391	51	370
22	378	52	375
23	374	53	385
24	380	54	390
25	370	55	385
26	379	56	380
27	370	57	377
28	379	58	389
29	377	59	378
30	381	60	375

**Tabla 3-7 Datos de peso específico**

El análisis se realizó mediante el uso del software Minitab 15, en la Figura 3-33, se muestran los gráficos resultantes del estudio.



**Figura 3-33 Capacidad de proceso del proceso de extrusión**

De la gráfica de datos individuales se observó que éstos se encuentran dentro de los límites reales de proceso basándonos en la regla empírica ( $\bar{X} \pm 3S$ ), además se observó que tanto el límite de control inferior como el límite superior son valores menores a los de la especificación y que los puntos siguen un patrón aleatorio.

En el gráfico del rango móvil se observó que los datos se distribuyen a lo largo del rango medio, observando que ligeramente hay más datos por debajo de éste, esta tendencia se vio más marcada en la gráfica que muestras las últimas 25 observaciones.

En el histograma se pudo observar más claramente la tendencia de los datos, algunos de ellos se encontraron sobre el límite inferior, lo que conlleva a un sesgo.

Mediante la prueba de Anderson Darling sobre la normalidad, se observó que los datos presentaron un valor p mayor al 0.05, por lo que se concluyó que los datos siguen una distribución normal.

En el gráfico de capacidad se observó que la magnitud de la especificación es menor que la del proceso, por lo que se concluyó que el proceso, a pesar de estar bajo control estadístico, no es capaz, esto se confirma con el valor de Cp, el cual es menor a 1.33; el Cpk con un valor de 0.62 nos indica que la media del proceso está alejada de los límites de especificación.

#### **3.7.4 Matriz del diseño de experimentos y niveles de operación de los factores**

Se llevó a cabo la matriz de un diseño experimental factorial fraccionado ( $2^{4-1}$ ) con tres puntos centrales y tres réplicas, dando un total de 33 corridas. Cada uno de los factores tuvo dos niveles, alto y bajo además de un punto intermedio para la información del punto central.

Los niveles de los factores de control se determinaron mediante los valores máximos y mínimos del historial de 6 meses de la empresa.

Dicho historial se analizó y se seleccionó el valor bajo como la media de los datos ( $\bar{X}$ ), y el valor alto como el valor de la media más tres desviaciones estándar de los datos ( $\bar{X} + 3\sigma$ ). Los valores de los niveles de cada factor se muestran en la Tabla 3-8.

<b>Condiciones Extrusor</b>			
<u>Nivel</u>	<u>Bajo</u>	<u>Medio</u>	<u>Alto</u>
Agua Extrusor (Kg/h)	183	229	275
Velocidad Extrusor (rpm)	380	390	400
Vapor (Kg/h)	0	25	50
Delta de temperatura (°C)	64	67	70
Temperatura R1 (°C)	30	30	30
Temperatura R2 (°C)	42	42	42
Temperatura R3 (°C)	69	72	75
Temperatura R4 (°C)	73	76	79
Temperatura R5 (°C)	80	83	86
Temperatura R6 (°C)	94	97	100

**Tabla 3-8 Condiciones de operación del extrusor durante la experimentación**

La matriz completa se generó mediante el software de programación estadística R, con el uso de los siguientes comandos.

```
install.packages("RcmdrPlugin.DoE",dependencies = TRUE)

library(RcmdrPlugin.DoE)
```

Al abrirse el plugin se seleccionaron las siguientes opciones: Design / Create design / Regular (Fractional) Factorial. Las opciones para crear el diseño fueron las siguientes:

- Número de factores: 4
- Número de puntos centrales: 3
- Número de bloques: 1
- Réplicas: 3
- Resolución: V+

El diseño resultante se muestra en la Figura 3-34, los niveles de los factores se codificaron para simplificar el análisis de resultados. El nivel bajo correspondió al -1, nivel medio al 0 y el nivel alto se codificó como +1.

	Agua	Vapor	Vel.motor	Temp
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	-1	-1	-1	-1
13	1	-1	-1	1
14	-1	1	-1	1
15	1	1	-1	-1
16	-1	-1	1	1
17	1	-1	1	-1
18	-1	1	1	-1
19	1	1	1	1
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	-1	-1	-1	-1
24	1	-1	-1	1
25	-1	1	-1	1
26	1	1	-1	-1
27	-1	-1	1	1
28	1	-1	1	-1
29	-1	1	1	-1
30	1	1	1	1
31	0	0	0	0
32	0	0	0	0
33	0	0	0	0

Figura 3-34 Diseño factorial fraccionado  $2^{4-1}$  codificado

El diseño sin codificación desplegando el delta de temperatura con los grados centígrados para cada una de las recámaras del extrusor se muestra en la Tabla 3-9.

<b>Agua (Kg/h)</b>	<b>Vapor (Kg/h)</b>	<b>Velocidad (rpm)</b>	<b>R1 (°C)</b>	<b>R2 (°C)</b>	<b>R3 (°C)</b>	<b>R4 (°C)</b>	<b>R5 (°C)</b>	<b>R6 (°C)</b>
183	0	380	30	42	69	73	80	94
275	0	380	30	42	75	79	86	100
183	50	380	30	42	75	79	86	100
275	50	380	30	42	69	73	80	94
183	0	400	30	42	75	79	86	100
275	0	400	30	42	69	73	80	94
183	50	400	30	42	69	73	80	94
275	50	400	30	42	75	79	86	100
229	25	390	30	42	72	76	83	97
229	25	390	30	42	72	76	83	97
229	25	390	30	42	72	76	83	97
183	0	380	30	42	69	73	80	94
275	0	380	30	42	75	79	86	100
183	50	380	30	42	75	79	86	100
275	50	380	30	42	69	73	80	94
183	0	400	30	42	75	79	86	100
275	0	400	30	42	69	73	80	94
183	50	400	30	42	69	73	80	94
275	50	400	30	42	75	79	86	100
229	25	390	30	42	72	76	83	97
229	25	390	30	42	72	76	83	97
229	25	390	30	42	72	76	83	97
183	0	380	30	42	69	73	80	94
275	0	380	30	42	75	79	86	100
183	50	380	30	42	75	79	86	100
275	50	380	30	42	69	73	80	94
183	0	400	30	42	75	79	86	100
275	0	400	30	42	69	73	80	94
183	50	400	30	42	69	73	80	94
275	50	400	30	42	75	79	86	100
229	25	390	30	42	72	76	83	97
229	25	390	30	42	72	76	83	97
229	25	390	30	42	72	76	83	97

**Tabla 3-9 Diseño factorial fraccionado sin codificar**

### 3.7.5 Realización del diseño experimental

Se realizó el arranque de la línea de producción, para la velocidad de alimentación y el pre-acondicionador se utilizaron los valores que se muestran en la Tabla 3-10, los cuales se establecieron con base al historial de la empresa, estas condiciones se mantuvieron constantes durante la experimentación.

Factor	Valor
Velocidad de alimentación	4500 Kg/h
Velocidad pre-acondicionador	70 rpm
Vapor pre-acondicionador	590 Kg/h
Agua pre-acondicionador	550 Kg/h

Tabla 3-10 Condiciones de alimentador y pre-acondicionador

Los parámetros para el alimentador y el pre-acondicionador se colocaron en el monitor de operación (Figura 3-35). De igual forma, los parámetros del extrusor para la primera corrida se colocaron en el monitor, posteriormente se esperó por 30 minutos para que las condiciones colocadas estuvieran estables en el proceso.

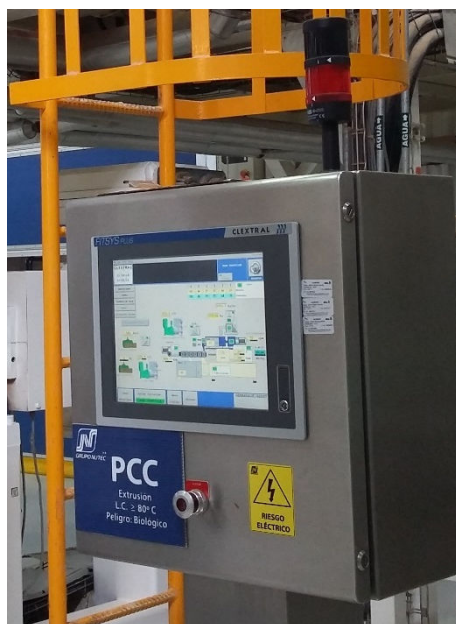


Figura 3-35 Monitor de operación



El tiempo de retención desde que ingresa la harina al alimentador hasta que sale del extrusor es de 20 minutos, sin embargo, para asegurar que la muestra estuviera fabricada bajo las condiciones colocadas en el monitor, se definió la toma de muestra 30 minutos después de haber colocado las condiciones.

Este proceso se realizó para cada una de las condiciones de corrida, las muestras se obtuvieron a la salida del extrusor (Figura 3-36 y Figura 3-37).



**Figura 3-36 Toma de muestra a salida de extrusor**



**Figura 3-37 Muestra a salida del extrusor**

Antes de obtener una muestra, se corroboró en el monitor que se tuvieran las condiciones requeridas por la corrida, para la temperatura de las recámaras, además de lo que marcaba el monitor, se determinó la temperatura con un termómetro infrarrojo.

Como resultado se obtuvieron en total 33 muestras, cada una de aproximadamente 3 kilogramos. Las muestras se identificaron como lo muestra la Tabla 3-11 y se colocaron en bolsas de plástico, en las cuales se dejaron enfriar por 2 horas.

Corrida	Identificación	Corrida	Identificación
1	Mex 1-1	6	Mex 6-1
	Mex 1-2		Mex 6-2
	Mex 1-3		Mex 6-3
2	Mex 2-1	7	Mex 7-1
	Mex 2-2		Mex 7-2
	Mex 2-3		Mex 7-3
3	Mex 3-1	8	Mex 8-1
	Mex 3-2		Mex 8-2
	Mex 3-3		Mex 8-3
4	Mex 4-1	9	Mex 9-1
	Mex 4-2		Mex 9-2
	Mex 4-3		Mex 9-3
5	Mex 5-1	10	Mex 10-1
	Mex 5-2		Mex 10-2
	Mex 5-3		Mex 10-3
		11	Mex 11-1
			Mex 11-2
			Mex 11-3

**Tabla 3-11 Identificación de muestras**

Transcurrido este tiempo, las muestras se enviaron al laboratorio Euronutec para su posterior análisis, donde cada una de ellas se identificó mediante un número cronológico para su trazabilidad (Figura 3-38).



**Figura 3-38 Muestras identificadas en laboratorio**

En el laboratorio, se realizaron los análisis para determinar la cocción del almidón siguiendo la técnica descrita en el apartado 3.6.1.

### **3.7.6 Análisis de resultados**

Después de realizados los experimentos, los datos obtenidos fueron analizados mediante el software Minitab 15 y el software de programación estadística R.

Se realizaron análisis de varianza para conocer la significancia de los factores incluidos en el experimento, así como de las interacciones de los mismos.

Mediante estos análisis se pudieron obtener conclusiones con base a los valores de los coeficientes de correlación, valores p de los factores y del modelo, la relación de  $R^2$  y  $R^2$  ajustada, etcétera; logrando así, elegir el mejor modelo que asegure un mejor porcentaje de cocción de almidón.

Las gráficas de residuales, efectos y contorno se interpretaron con el fin de llegar a la obtención de la mejor combinación de las variables.

Además, se analizaron los resultados tomando en cuenta la desviación estándar para evaluar el efecto de los factores de ruido sobre los de control.

### **3.7.7 Validación de condiciones ideales resultantes**

Una vez obtenidas las mejores condiciones, se realizó un monitoreo de los resultados de la siguiente corrida, se tomaron 10 muestras en lapsos de tiempo de 1 hora durante la corrida y se enviaron al laboratorio para su análisis. Los datos fueron analizados mediante una prueba t en el software Minitab 15.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados obtenidos

Los promedios de los datos del porcentaje de cocción de almidón para cada una de las corridas experimentales se analizaron en el software R. En la Tabla 4-1 se presenta la matriz experimental con la variable respuesta que corresponde a cada corrida, así como su desviación estándar resultante de las réplicas del experimento.

Agua (Kg/h)	Vapor (Kg/h)	Velocidad (rpm)	Delta de Temperatura (°C)	Cocción de Almidón (%)
183	0	380	64	90.18
275	0	380	70	80.08
183	50	380	70	84.77
275	50	380	64	85.03
183	0	400	70	77.08
275	0	400	64	81.26
183	50	400	64	88.66
275	50	400	70	79.91
229	25	390	67	81.74
229	25	390	67	81.36
229	25	390	67	82.25

Tabla 4-1 Datos del porcentaje de cocción de almidón

### 4.2 Análisis de varianza

Se determinaron las variables significativas, es decir, aquellas que influían sobre la respuesta y para ello se realizó un primer modelo considerando los cuatro factores, así como sus interacciones, se utilizó la optimización automática que brinda el software RStudio mediante un algoritmo por pasos, para reducir los términos que no eran significativos.

Las variables se identificaron como sigue:

- Agua = agua

- Vapor = vap
- Velocidad de motor = vel
- Delta de temperatura = tem
- Porcentaje de cocción de almidón = coccion

El modelo resultante se muestra en la Figura 4-1 y a partir de este modelo, el análisis se realizó de manera manual para la reducción de términos no significativos.

```

> m1<-lm(coccion~(agua+vel+vap+tem)^4)
> m0step<-step(m1)
Start: AIC=-10.59
coccion ~ (agua + vel + vap + tem)^4

              Df Sum of Sq   RSS     AIC
<none>                0.8174 -10.5947
- agua:vel:vap:tem  1    3.6944  4.5118    6.1967
> anova(m1)
Analysis of Variance Table

Response: coccion
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
agua      1  25.956  25.956  63.5087 0.015383 *
vel       1  21.615  21.615  52.8880 0.018388 *
vap       1  11.932  11.932  29.1941 0.032588 *
tem       1  67.803  67.803 165.8992 0.005974 **
agua:vel  1   3.472   3.472   8.4943 0.100322
agua:vap  1   0.826   0.826   2.0201 0.291128
agua:tem  1  14.285  14.285  34.9511 0.027439 *
agua:vel:vap:tem  1   3.694   3.694   9.0393 0.095108 .
Residuals 2   0.817   0.409

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Figura 4-1 Primer modelo optimizado automáticamente para el porcentaje de cocción de almidón (RStudio)

Los modelos generados se muestran en la Figura 4-2 se puede observar como en el modelo denotado como m2, la interacción entre el agua y el vapor no fue significativa, ordenando su depuración por valor p.

En el modelo m3, la interacción entre el agua y la velocidad del motor no fue significativa y se observó que los efectos principales, así como la interacción del agua y la temperatura fueron significativos.

```

> m2<-lm(coccion~agua+vap+vel+tem+agua*vap+agua*vel+agua*tem)
> anova(m2)
Analysis of Variance Table

Response: coccion
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
agua   1  25.956   25.956  17.2589 0.025354 *
vap    1  11.932   11.932   7.9337 0.066922 .
vel    1  21.615   21.615  14.3726 0.032198 *
tem    1  67.803   67.803  45.0841 0.006742 **
agua:vap 1   0.826    0.826   0.5490 0.512462
agua:vel 1   3.472    3.472   2.3084 0.225994
agua:tem 1  14.285   14.285   9.4982 0.054055 .
Residuals 3   4.512    1.504
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> m3<-lm(coccion~agua+vap+vel+tem+agua*vel+agua*tem)
> anova(m3)
Analysis of Variance Table

Response: coccion
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
agua   1  25.956   25.956  19.4523 0.011596 *
vap    1  11.932   11.932   8.9419 0.040326 *
vel    1  21.615   21.615  16.1992 0.015801 *
tem    1  67.803   67.803  50.8137 0.002048 **
agua:vel 1   3.472    3.472   2.6017 0.182043
agua:tem 1  14.285   14.285  10.7053 0.030734 *
Residuals 4   5.337    1.334
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Figura 4-2 Modelos generados para reducción de términos no significativos (RStudio)

Después de la eliminación de todos los términos no significativos, se obtuvo el modelo denotado como m4 (Figura 4-3), el cual indicó que los cuatro factores involucrados fueron significativos como efecto principal, así como la interacción

entre el agua y la temperatura, esto de acuerdo a los valores p que se obtuvieron en el ANOVA, puesto que fueron menores al nivel de significancia cuyo valor fue de 0.05.

De este modelo se pudo concluir que el delta de temperatura fue el factor más importante, seguido de la velocidad del motor, el agua, el vapor y la interacción.

```
> m4<-lm(coccion~agua+vap+vel+tem+agua*tem)
> anova(m4)
Analysis of Variance Table

Response: coccion
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
agua   1  25.956   25.956  14.7327 0.012144 *
vap    1  11.932   11.932   6.7724 0.048111 *
vel    1  21.615   21.615  12.2689 0.017235 *
tem    1  67.803   67.803  38.4851 0.001589 **
agua:tem 1  14.285   14.285   8.1079 0.035931 *
Residuals 5   8.809    1.762
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figura 4-3 ANOVA final para el porcentaje de cocción de almidón (RStudio)

Después de haber obtenido los factores que influían sobre la respuesta, se procedió a realizar la regresión para obtener los coeficientes del modelo (Figura 4-4).

```
Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  83.0164     0.4002  207.435 4.94e-11 ***
agua         -1.8013     0.4693   -3.838 0.01214 *
vap          1.2212     0.4693    2.602 0.04811 *
vel         -1.6438     0.4693   -3.503 0.01723 *
tem         -2.9113     0.4693   -6.204 0.00159 **
agua:tem     1.3363     0.4693    2.847 0.03593 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.327 on 5 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9414,    Adjusted R-squared:  0.8829
F-statistic: 16.07 on 5 and 5 DF,  p-value: 0.00423
```

Figura 4-4 Análisis de regresión del modelo (RStudio)



Mediante el valor de  $R^2=0.9414$ , se observó que el modelo es capaz de predecir el porcentaje de cocción de almidón, además de que la diferencia entre  $R^2$  y  $R^2$  ajustada fue pequeña lo que indicó que el modelo no es tan complejo, es decir, se ajusta de manera correcta a los datos.

De acuerdo al valor p del modelo cuyo valor fue de 0.00423, se observó que el modelo también fue significativo, es decir, fue representativo de la variación de los datos.

El modelo final quedó de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \%Cocción = & 83.0164 - 1.8013(\text{agua}) + 1.2212(\text{vapor}) \\ & - 1.6438(\text{velocidad del motor}) - 2.9113(\Delta \text{ temperatura}) \\ & + 1.3363(\text{agua} * \Delta \text{ temperatura}) \end{aligned}$$

El análisis también se realizó en el software Minitab 15, en donde se obtuvieron los mismos factores de influencia sobre la respuesta y los mismos coeficientes (Figura 4-5 y Figura 4-6).

Análisis de varianza para coccion (unidades codificadas)					
Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F
Efectos principales	4	127.306	127.306	31.8265	24.89
2-Interacciones de (No.) factores	1	14.285	14.285	14.2845	11.17
Curvatura	1	3.694	3.694	3.6944	2.89
Error residual	4	5.115	5.115	1.2787	
Falta de ajuste	2	4.297	4.297	2.1486	5.26
Error puro	2	0.817	0.817	0.4087	
Total	10	150.399			
Fuente					
					P
Efectos principales					0.004
2-Interacciones de (No.) factores					0.029
Curvatura					0.164
Error residual					
Falta de ajuste					0.160
Error puro					
Total					

Figura 4-5 ANOVA para cocción de almidón (Minitab 15)

Efectos y coeficientes estimados para coccion (unidades codificadas)					
Término	Efecto	Coef	Coef. de EE	T	P
Constante		83.371	0.3998	208.54	0.000
agua	-3.603	-1.801	0.3998	-4.51	0.011
vapor	2.442	1.221	0.3998	3.05	0.038
vel	-3.288	-1.644	0.3998	-4.11	0.015
tem	-5.823	-2.911	0.3998	-7.28	0.002
agua*tem	2.672	1.336	0.3998	3.34	0.029
Ct Pt		-1.301	0.7655	-1.70	0.164

S = 1.13078      PRESS = \*

R-cuad. = 96.60%      R-cuad. (pred.) = \*%      R-cuad. (ajustado) = 91.50%

**Figura 4-6 Regresión para cocción de almidón (Minitab 15)**

Algo importante que se pudo observar mediante Minitab, puesto que el software R no lo reporta, es la curvatura del modelo, la cual resultó no ser significativa.

### 4.3 Análisis de residuales y gráficas de efectos

Se analizaron los residuales del modelo que se muestran en la Figura 4-7, en la gráfica de probabilidad se observó que los datos se encuentran alrededor de la línea de normalidad por lo que se consideraron normales.

Se observó que el histograma de residuos no está sesgado y que los valores de los residuos son máximos de +/- 1 punto. En la gráfica de residuos versus ajustes y versus orden se presentó un patrón aleatorio de los datos, además de no presentar datos atípicos, no se observó ningún efecto sobre los datos relacionado con el tiempo.

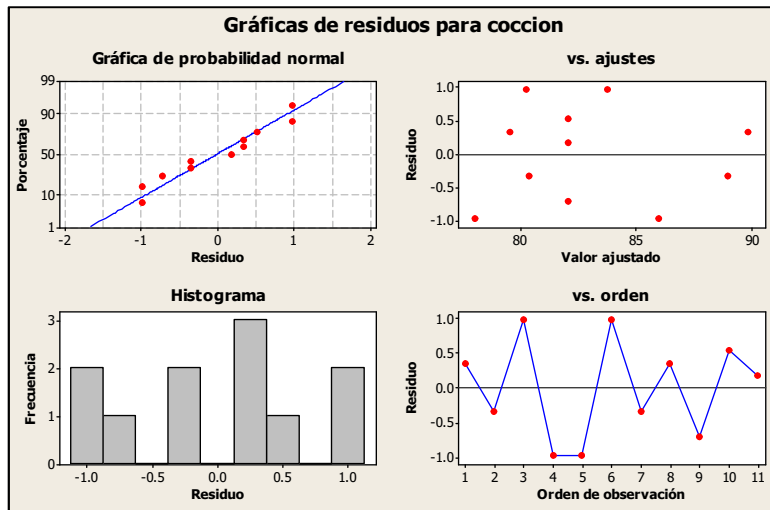


Figura 4-7 Gráfica de residuales para la cocción del almidón

Mediante el diagrama de Pareto (Figura 4-8) se observó gráficamente que el mayor efecto sobre la cocción del almidón es dado por el delta de temperatura, seguido del agua, la velocidad, la interacción entre agua y temperatura, siendo el vapor el factor de menor efecto sobre la respuesta. La gráfica de efectos normales absolutos (Figura 4-9), concluye la misma información, ya que, si los puntos están alejados de la línea, indica que influyen sobre la respuesta y entre más lejos se encuentren, más importante es el efecto.

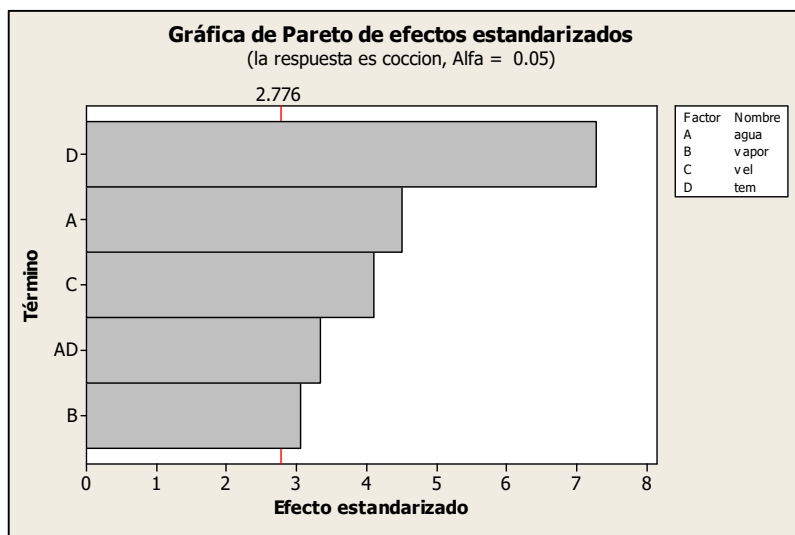


Figura 4-8 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

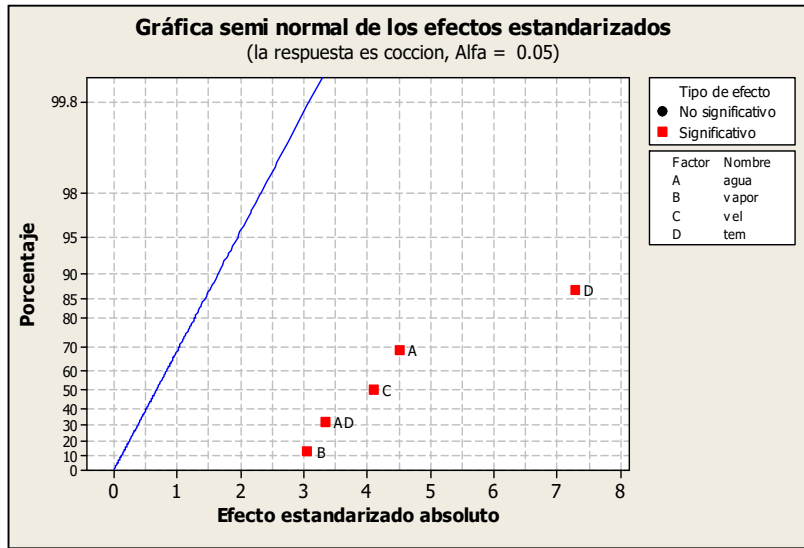


Figura 4-9 Gráfica de efectos estandarizados

#### 4.4 Gráficas de contorno

Se realizaron las gráficas de contorno, las cuales permitieron observar de manera gráfica los mejores niveles de los factores, es decir, los niveles en los que la respuesta era mayor. Se observó que, si todos los factores excepto el vapor, se mantienen a niveles bajos en el rango estudiado, se obtienen mayores porcentajes de cocción de almidón (Figura 4-10 y Figura 4-11).

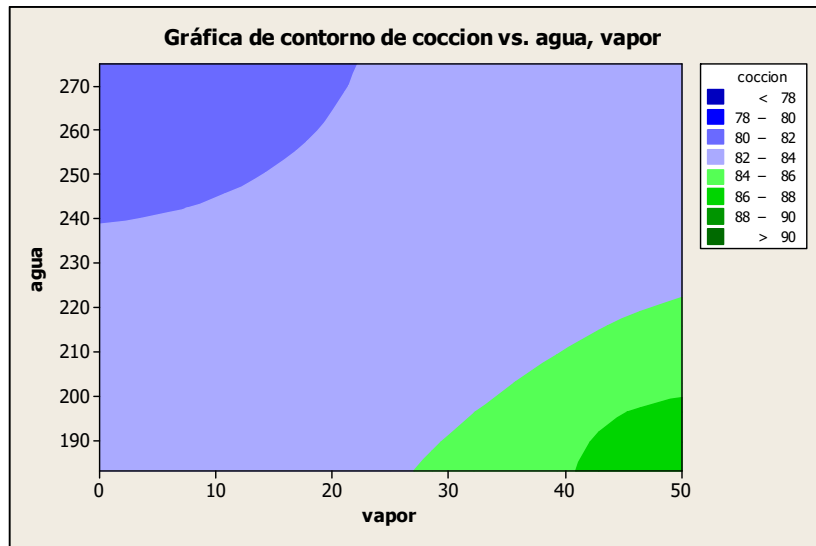


Figura 4-10 Gráfica de contorno para vapor y agua del extrusor

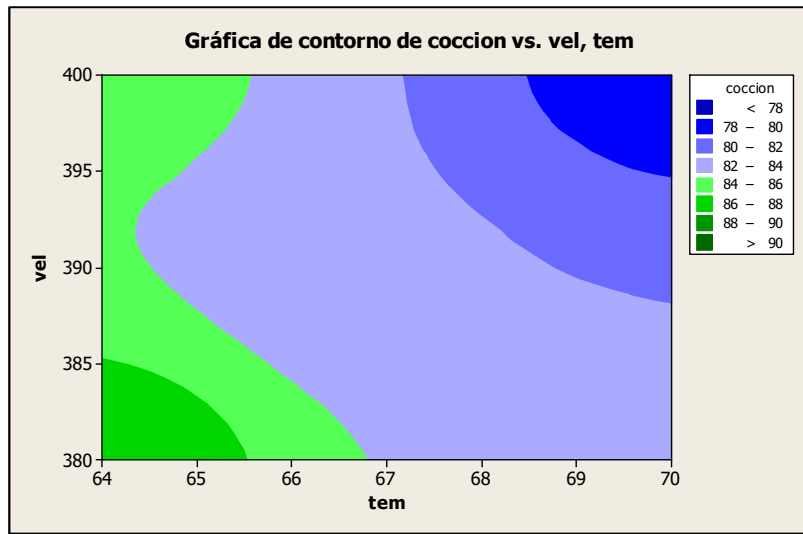


Figura 4-11 Gráfica de contorno para velocidad y temperatura del extrusor

#### 4.5 Optimizador de respuesta

Se utilizó el optimizador de respuesta del software Minitab 15, los valores óptimos que se recomendaron se muestran en la Figura 4-12. Con estos valores de los factores de control se espera un valor de cocción de almidón de 92.28%.

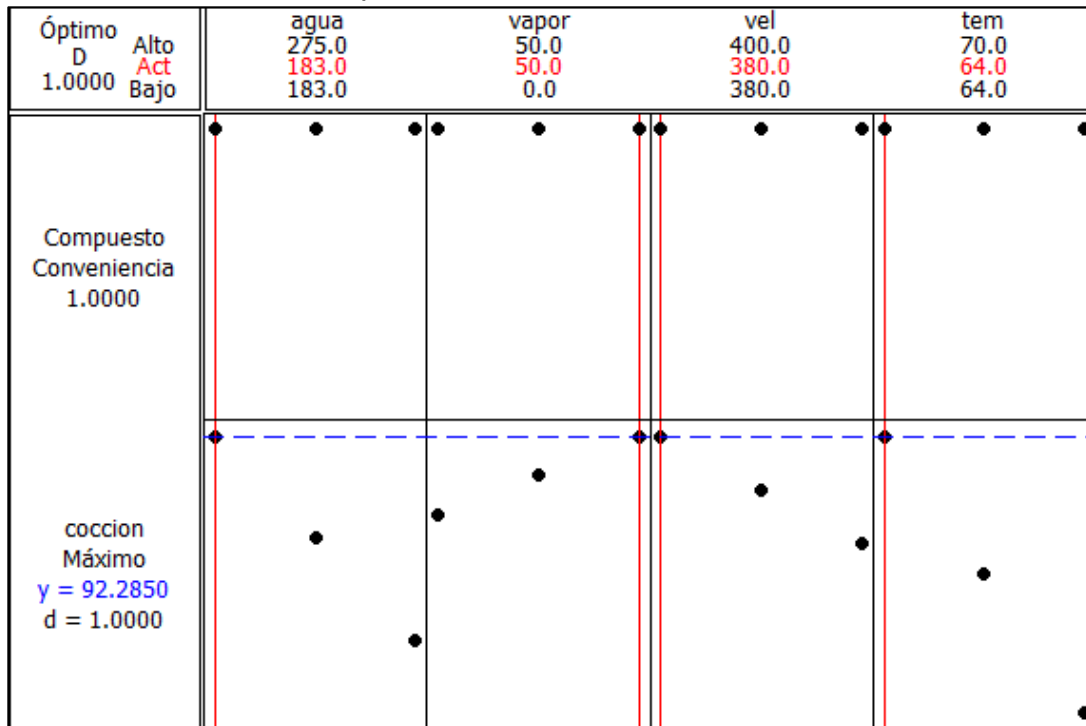


Figura 4-12 Condiciones óptimas para la cocción del almidón

#### 4.6 Efecto de los factores de ruido

Los resultados se analizaron en el software Minitab, tomando en cuenta no solo los promedios, sino cada una de las réplicas de cada corrida. Esto para determinar la influencia de los factores de ruido y descartar que algún efecto de los factores de control estuviera enmascarado por el ruido en el experimento.

La tabla de resultados expresados como promedios con sus respectivas desviaciones estándar se muestra en la Tabla 4-2.

Agua (Kg/h)	Vapor (Kg/h)	Velocidad (rpm)	Delta de Temperatura (°C)	Cocción de Almidón (%)	SD
183	0	380	64	90.18	0.76
275	0	380	70	80.08	0.35
183	50	380	70	84.77	0.39
275	50	380	64	85.03	0.52
183	0	400	70	77.08	0.34
275	0	400	64	81.26	0.47
183	50	400	64	88.66	0.25
275	50	400	70	79.91	0.15
229	25	390	67	81.74	0.58
229	25	390	67	81.36	0.51
229	25	390	67	82.25	0.17

**Tabla 4-2 Resultados del porcentaje de cocción de almidón con desviación estándar**

Los resultados obtenidos de este análisis se muestran en las figuras Figura 4-14 y Figura 4-13, donde se observó que los efectos para las medias, así como para la relación señal/ruido son muy similares, con lo que se puede concluir que los factores de ruido no afectan el efecto de los factores de control en el proceso de extrusión.

Además, la magnitud de los efectos, indicaron que a menor contenido de agua, mayor vapor, menor velocidad y menor delta de temperatura se obtienen porcentajes mayores de cocción de almidón; misma conclusión a la que se llegó con el análisis previamente realizado.

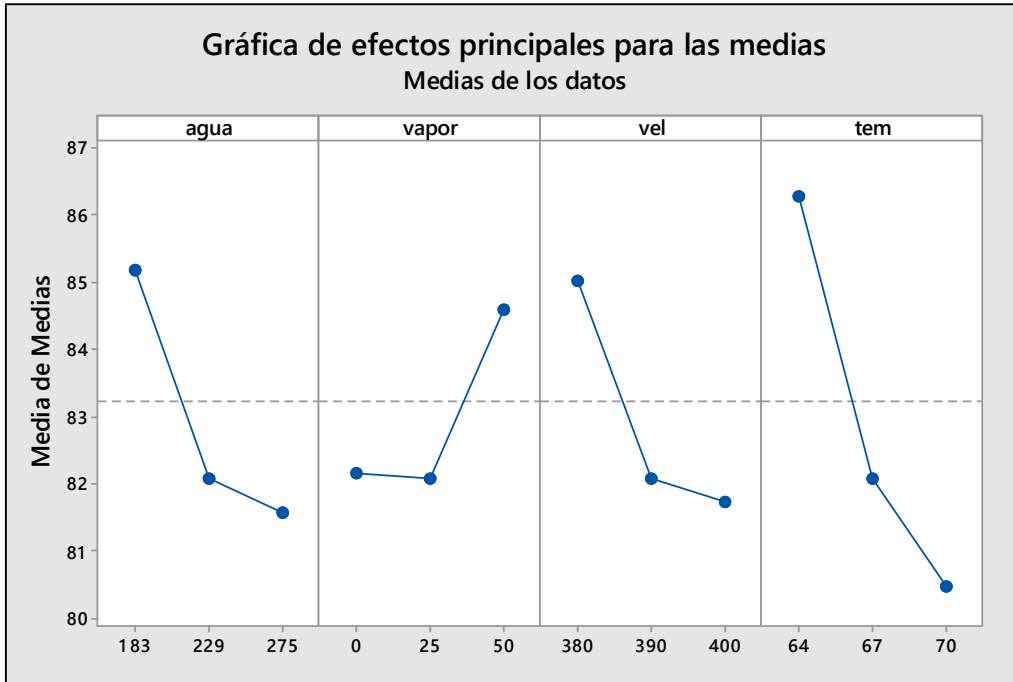


Figura 4-14 Gráfica de efectos principales para la media de los datos

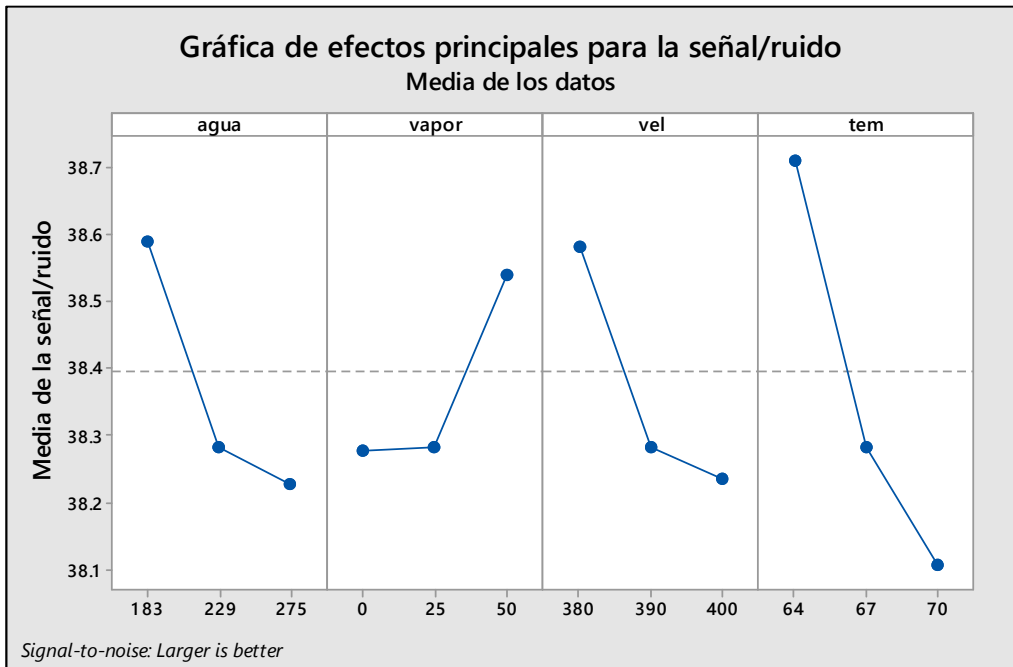


Figura 4-13 Gráfica de efectos principales para la relación señal/ruido de los datos

#### 4.7 Validación de los valores óptimos

Se colocaron nuevamente en proceso los valores óptimos para la cocción del almidón, las condiciones utilizadas tanto de pre-acondicionador como de extrusor se muestran en la Tabla 4-3.

<b>Factor</b>	<b>Valor</b>
Velocidad de alimentación	4500 Kg/h
Velocidad pre-acondicionador	70 rpm
Vapor pre-acondicionador	590 Kg/h
Agua pre-acondicionador	550 Kg/h
Agua extrusor	183Kg/h
Vapor extrusor	50Kg/h
Velocidad del extrusor	380rpm
Delta de temperatura	64°C
R1	30 °C
R2	42 °C
R3	69 °C
R4	73 °C
R5	80 °C
R6	94 °C

**Tabla 4-3 Valores óptimos de proceso**

Se inició la corrida de la fórmula analizada y se esperó una hora para la estabilización del sistema, transcurrido el tiempo se tomaron 10 muestras en intervalos de 1 hora, dichas muestras fueron enviadas al laboratorio para su posterior análisis, los resultados se muestran en la Tabla 4-4.



Muestra	Agua extrusor (Kg/h)	Vapor extrusor (Kg/h)	Velocidad del extrusor (rpm)	Delta de temperatura (°C)	Cocción de almidón (%)
Mex1	183	50	380	64	92.86
Mex2	183	50	380	64	91.79
Mex3	183	50	380	64	91.51
Mex4	183	50	380	64	90.12
Mex5	183	50	380	64	90.40
Mex6	183	50	380	64	91.60
Mex7	183	50	380	64	92.44
Mex8	183	50	380	64	92.61
Mex9	183	50	380	64	92.49
Mex10	183	50	380	64	90.84

Tabla 4-4 Resultados validación de condiciones óptimas de proceso

Se realizó una prueba t de Student, para comprobar que, colocando las condiciones óptimas en proceso, se obtendría un porcentaje de cocción del 92.28% tal como lo predice el modelo, donde los supuestos fueron los siguientes:

$$H_0: \mu = 92.28$$

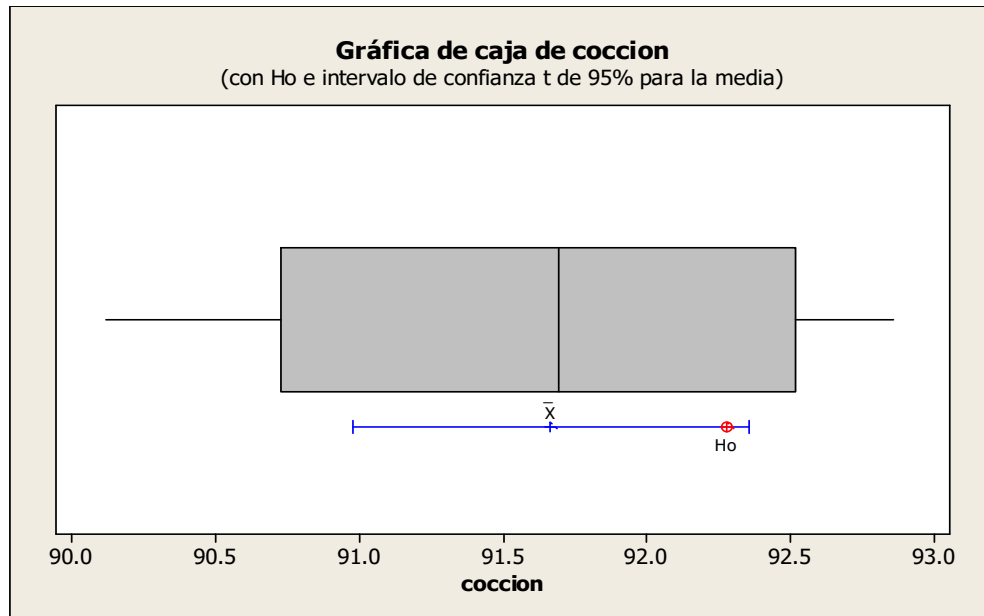
$$H_A: \mu \neq 92.28$$

Con un nivel de significancia ( $\alpha=0.05$ ), la prueba se realizó en el programa Minitab, los resultados se muestran en la Figura 4-15.

T de una muestra: coccion							
Prueba de mu = 92.28 vs. no = 92.28							
Variable	N	Media	Desv.Est.	Media del Error estándar	IC de 95%	T	P
coccion	10	91.666	0.961	0.304	(90.978, 92.354)	-2.02	0.074

Figura 4-15 Prueba t de Student

La prueba resultó en un valor  $T=-2.02$ , al cual le corresponde una probabilidad de 0.074, este valor es mayor al nivel de significancia, por lo que se acepta  $H_0$ , es decir no existe diferencia significativa de los datos respecto al valor 92.28. En la Figura 4-16 se muestra la distribución de los datos y se observó que el valor objetivo se encuentra dentro de los límites del diagrama de caja.



**Figura 4-16 Diagrama de caja para el porcentaje de cocción del almidón**

#### **4.8 Recomendaciones**

- Realizar gráficos de control alimentados diariamente para detectar alguna causa especial de variación.
- Seguir el monitoreo del porcentaje de cocción de almidón para alimentación de ecuación NIR (Near Infrared Spectroscopy).
- Seguir realizando los mantenimientos y calibraciones a todos los sensores del equipo para asegurar que lo que se observa en monitor es realmente lo que se tiene en proceso.

## 5. CONCLUSIONES

Mediante esta investigación se logró la identificación de los factores significativos del proceso de extrusión de alimentos para mascotas mediante un diseño factorial fraccionado con puntos centrales, se pudieron observar las magnitudes de cada uno de los efectos de los factores y se pudieron definir los niveles óptimos de los mismos, los cuales fueron:

- Agua extrusor: 183 Kg/h
- Vapor extrusor: 50 Kg/h
- Velocidad del extrusor: 380 rpm
- Delta de temperatura: 64°C

Se demostró que es posible aumentar el porcentaje de cocción de almidón de los alimentos para mascotas a valores mayores al 77%, en este caso a un porcentaje aproximado al 92%, lográndose así, el objetivo de esta investigación.

Se obtuvo un modelo matemático que puede predecir la variable respuesta, y mediante las muestras analizadas para la confirmación de las condiciones propuestas, se concluyó que el modelo es repetible y reproducible.

Se concluye que los parámetros de proceso tales como las temperaturas de las recámaras, agua, vapor y velocidad del motor del extrusor deben ser controladas cuidadosamente con el propósito de controlar la calidad del extruido.

La información y los resultados de esta investigación podrán ser utilizados como apoyo o referencia en áreas como calidad y producción, la metodología de este trabajo puede ser considerada como base para otros estudios, los cuales podrían enfocarse en otros parámetros de interés para la empresa, tales como pérdida de vitaminas, reactividad de lisina, minerales y sus interacciones.

De igual forma, este diseño puede ser aplicado en las demás líneas de producción de alimentos para mascotas de la empresa Nueva Tecnología en Alimentación S.A. de C.V.

Mediante esta investigación se logró la reducción de los costos generados por la realización de las pruebas en campo con el fin de determinar el parámetro de cocción del almidón ya que éste está asegurado mediante las condiciones de proceso (precio por prueba: \$21000.00 pesos).

Además, el porcentaje de cocción de almidón que aseguramos en proceso será un distintivo para el producto que podrá ser plasmado en el empaque y divulgado entre nuestros distribuidores, con lo que se proyecta un aumento en las ventas.

Cabe mencionar, que los diseños experimentales a nivel industrial son esenciales para la mejora de procesos, ya que brindan la información necesaria para la solución de un problema y sus diversas variantes permiten el balance perfecto entre costo – beneficio, necesario para que las empresas decidan realizarlo o no.

## 6. REFERENCIAS

Akhtar, J., y M. A. Khan. 2015. Extruded Pet Food Development from Meat Byproducts using Extrusion Processing and its Quality Evaluation. *J. Food Process. Technol.* 7:1-5.

Aldrich, G. 2009. *Feed Stuffs*. Feedstuffs 81:13-15.

Carciofi, A. C., y F. C. Sá. 2014. Extrusion processing conditions and food utilization by dogs and cats. *Congr. Int. y XIII Simp. sobre Nutr. Anim.*

Clextral. 2016. Extrusión de doble tornillo: Características.

El-Khalek, E., y G. Janssens. 2010. Effect of extrusion processing on starch gelatinisation and performance in poultry. *Worlds. Poult. Sci. J.* 66:53-64.

Emin, M. A., T. Teumer, W. Schmitt, M. Rädle, y H. P. Schuchmann. 2016. Measurement of the true melt temperature in a twin-screw extrusion processing of starch based matrices via infrared sensor. *J. Food Eng.* 170:119-124. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.09.018>

Garg, A. 2013. Stochastic modeling of expansion and shrinkage phenomena in starch based melts during extrusion. Kansas State University.

Gibson, M., y S. Alavi. 2013. Pet Food Processing- Understanding Transformations in Starch during Estrusion and Baking. *Cereal Foods World* 58:232-236. Available from: <http://www.aacnet.org/publications/plexus/cfw/pastissues/2013/Pages/CFW-58-5-0232.aspx>

Gibson, M. 2015. Physico-Chemical and Shelf life between baked ans extruded pet foods. Kansas State University.

Gómez, L. M. 2013. Introducción a la Nutrición de Caninos y Felinos. *J. Agric. Anim. Sci.* 2:52-67.

Gutiérrez, H., y R. De la Vara. 2008. Análisis y diseño de experimentos. Segunda Ed. Mc Graw Hill.

Harris, B. 2002. Transactional Six Sigma and Lean Servicing: Leveraging Manufacturing Concepts to Achieve World Class Service. St. Lucie Press.

Jiju, A. 2014. Design of Experiments for Engineers and Scientist. Segunda. Elsevier.

Lankhorst, C., Q. D. Tran, R. Havenaar, W. H. Hendriks, y A. F. B. van der Poel. 2007. The effect of extrusion on the nutritional value of canine diets as assessed by in vitro indicators. Anim. Feed Sci. Technol. 138:285-297.

Lin, S., F. Hsieh, y H. . Huff. 1998. Effects of Lipids and Processing Conditions on Degree of Starch Gelatinization of Extruded Dry Pet Food. Anim. Feed Sci. Technol. 71:283-294. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840197001570>

López, D. 2011. Efecto del proceso de extrusión sobre los inhibidores de tripsina y actividad ureásica en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Available from: <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/853/1/RI000415.pdf>

Meneses, J., C. M. Corrales, y M. Valencia. 2007. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. Rev. Esc. Ing. Antioquía:57-67. Available from: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=32767495&lang=es&site=ehost-live>

Prat, A., X. Tot-Martorell, L. Pozueta, y I. Solé. 1997. Métodos Estadísticos. Control y mejora de la calidad. Primera Ed. UPC.

Puvača, N., V. Stanačev, D. Glamočić, y J. Lević. 2012. Application of the process of extrusion and micronisation and their influence on nutritive value of feedstuffs. ... Biodiversity–Step ...:197-202. Available from: [http://semenarska.rs/UNS-PSU/radovi/2/40 Application 197-202.pdf](http://semenarska.rs/UNS-PSU/radovi/2/40%20Application%20197-202.pdf)

Rahman, M. A. U., A. Rehman, X. Chuanqi, Z. X. Long, C. Binghai, J. Linbao, y S. Huawei. 2015. Extrusion of Feed/Feed Ingredients and Its Effect on Digestibility and

- Performance of Poultry: A Review. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 4:48-61.
- Ramírez, G. 2011. El proceso de extrusión de plástico.
- Rincón, I. V., C. Fonseca, G. Isabel, y N. John. 2009. Almidón de arracacha como ingrediente funcional para la elaboración de compotas.
- Rokey, G. J., B. Plattner, y E. M. de Souza. 2010. Feed extrusion process description. *Rev. Bras. Zootec.* 39:510-518. Available from: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-35982010001300055&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982010001300055&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
- Souza, R. C. R., y C. T. Andrade. 2002. Investigation of the gelatinization and extrusion processes of corn starch. *Adv. Polym. Technol.* 21:17-24.
- Tanco, P. M. 2008. Metodología para la aplicación del Diseño de Experimentos ( DoE ) en la industria. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra.
- Tostado, E. C., y J. Dominguez. 2001. Diseño de Experimentos para el desarrollo tecnológico y mejora industrial. Just in Time Press.
- Tran, Q. 2008. Extrusion processing: Effects on Dry Canine Diets. Wageningen University and Research Centre.
- Verdoy, P., J. Mahiques, S. Sagasta, y R. Sirvent. 2006. Manual de Control Estadístico de Calidad: Teoría y Aplicaciones. Tercera Ed. Publicacions de la Universitat Jaume I, España.
- Vilar, J. F. 2005. Control Estadístico de los Procesos (SPC). Primera ed. Fundación Confemetal, España.
- Ziggers, D. 2005. Controlling starch cook and bulk density of petfood. *Feed Tech* 9:17-20.