



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA REDUCCIÓN DE
LA VARIACIÓN DEL PESO DE PRODUCTO TERMINADO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN
DE ALIMENTOS**

Carlos Estuardo Vela Dávila

Asesorado por el Mtro. Luis Carlos Leonardo Bolaños Méndez

Guatemala, julio de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA REDUCCIÓN DE
LA VARIACIÓN DEL PESO DE PRODUCTO TERMINADO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN
DE ALIMENTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS ESTUARDO VELA DÁVILA

ASESORADO POR EL MTRO. LUIS CARLOS BOLAÑOS MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO INDUSTRIAL

GUATEMALA, JULIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
EXAMINADOR	Ing. Selvin Estuardo Joachín Juárez
EXAMINADORA	Inga. Sindy Massiel Godinez Bautista
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL PESO DE PRODUCTO TERMINADO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 28 de abril de 2021.

Carlos Estuardo Vela Dávila

Ref. EEPFI-0529-2021
Guatemala, 28 de abril de 2021

Director
César Ernesto Urquizú Rodas
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Presente.

Estimado Ing. Urquizú:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: DISEÑO Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL PESO DE PRODUCTO TERMINADO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS**, presentado por el estudiante **Carlos Estuardo Vela Dávila** carné número **201403764**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Estadística Aplicada.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Luis Carlos Leonardo Bolaños Méndez
Asesor



Mtro. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco
Coordinador de Maestría
Estadística Aplicada



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIMI-037-2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL PESO DE PRODUCTO TERMINADO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Estuardo Vela Dávila**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



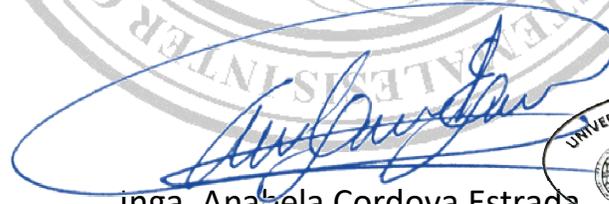
Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, abril de 2021

DTG. 285.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL PESO DE PRODUCTO TERMINADO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Estuardo Vela Dávila**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, julio 2021

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser una importante influencia en mi vida y mi carrera, y por permitirme alcanzar una meta más.
- Mis padres** Víctor Vela y Olga Dávila, por ser siempre mi apoyo incondicional y la inspiración para seguir adelante.
- Mis hermanos** Víctor y Olga Vela, por siempre ser mi ejemplo y enseñarme como ser cada vez mejor.
- Mis abuelos** Por ser todas sus enseñanzas y consejos.
- Familia y amigos** Por las todas las experiencias compartidas a lo largo de los años y todo su apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma mater</i> y formarme a base de conocimientos y valores.
Facultad de Ingeniería	Por todos los conocimientos y las experiencias que me brindó, y por formarme como profesional.
Mis amigos de la Facultad	Por su apoyo y su compañía a lo largo de este camino, por estar conmigo en los momentos más complicados y en los más felices.
Mtro. Carlos Bolaños	Por su tiempo y su apoyo asesorando el presente diseño de investigación.
Empresa productora de alimentos	Por brindarme la información necesaria para realizar este diseño de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
4. JUSTIFICACIÓN.....	11
5. OBJETIVOS.....	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN.....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Diseño y análisis experimental.....	17
7.1.1. Diseños factoriales.....	18

	7.1.1.1.	Diseño factorial 2^k	19
	7.1.2.	Análisis de varianza.....	19
	7.1.3.	Contrastes para medias de experimentos multivariabales	24
	7.1.3.1.	Método de diferencia mínima significativa de Fisher.....	24
	7.1.3.2.	Método de Tuckey-Kramer para comparaciones múltiples	25
	7.1.4.	Covariables	26
	7.1.5.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov.....	27
	7.1.6.	Muestreo sistemático.....	28
7.2.		Mejora continua de procesos	29
	7.2.1.	Metodología seis sigma	30
	7.2.1.1.	Índices de capacidad de procesos	31
7.3.		Proceso de producción de <i>Snacks</i> extruidos y horneados	33
	7.3.1.	Extrusión	33
	7.3.2.	Horneado	34
	7.3.3.	Aplicación de sabor	34
	7.3.4.	Empaque.....	34
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	37
9.		METODOLOGÍA.....	39
	9.1.	Características del estudio	39
	9.2.	Unidades de análisis	39

9.3.	Variables	40
9.4.	Fases del estudio.....	41
9.4.1.	Fase 1: revisión de literatura	41
9.4.2.	Fase 2: estudio preliminar y determinación de tamaño de muestra	42
9.4.3.	Fase 3: recolección de la información	42
9.4.4.	Fase 4: análisis de información	43
9.4.5.	Fase 5: interpretación de información	43
9.4.6.	Fase 6: redacción del informe final.....	44
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	45
11.	CRONOGRAMA.....	47
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	49
13.	REFERENCIAS.....	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Distribución de Fisher con $\alpha = 5 \%$	24
2.	Desviaciones estándar en una distribución normal.....	30

TABLAS

I.	Planteamiento de un análisis de varianza de un factor.....	19
II.	Interpretación de índices Cp y Cpk.....	32
III.	Variables de estudio.....	40
IV.	Diseño de tratamientos propuesto.....	43
V.	Cronograma de actividades	47
VI.	Recursos necesarios para la investigación.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
τ	Efecto de un tratamiento
β	Efecto de una covariable
ξ	Error no explicado
Ha	Hipótesis alterna
Ho	Hipótesis nula
h	Humedad
=	Igual que
\bar{X}	Media de un conjunto de datos
μ	Media poblacional
α	Nivel de significancia
a	Niveles de cada factor
k	Número de factores de un experimento
W	Peso en gramos
%	Porcentaje
Q	Quetzales
Σ	Sumatoria

T	Temperatura en grados Fahrenheit
R	Tiempo de residencia en segundos
σ^2	Varianza poblacional
Ve	Velocidad de maquinaria de extrusión

GLOSARIO

Anova	Análisis de la varianza.
Covariable	Variable independiente que junto a una o más variables sirve para explicar una variable respuesta continua.
Cp	Índice de capacidad de un proceso con respecto a la tolerancia del mismo.
Cpk	Índice de capacidad de un proceso con respecto a su eje central.
Estadístico	Variable que se calcula a partir de valores provenientes de una muestra para evaluar una hipótesis.
Hipótesis alternativa	Suposición que no desea validarse.
Hipótesis nula	Suposición que desea validarse.
Inferir	Deducir una conclusión a partir de los datos disponibles.
<i>lean manufacturing</i>	Metodología de trabajo enfocada en la mejora continua.

Muestreo	Selección de un subconjunto de datos con el fin de analizar el comportamiento del total de datos.
RTCA 01.01.11:06	Reglamento Técnico Centroamericano que regula la cantidad mínima de los productos preempacados.
Sistema gravimétrico	Sistema de empaque con dosificación por peso.
Varianza	Medida de dispersión de un conjunto de datos.

RESUMEN

El peso mínimo para la comercialización de un producto preempacado está establecido a través del Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 01.01.11:06), que establece la cantidad mínima aceptable de estos productos, con respecto a su peso neto, para cumplir con esta normativa las empresas deben de minimizar la variabilidad de sus procesos para no incurrir en pérdidas por sobrepeso o perdidas por reprocesamiento de producto.

El objetivo del presente diseño de investigación es sentar las bases para generar información basada en el análisis estadístico sobre el comportamiento que tiene un proceso productivo de alimentos preempacados ante la modificación de sus parámetros de producción dentro de los rangos aceptables establecidos para los distintos productos por parte del departamento de control de calidad, y encontrar las condiciones que minimicen las variabilidad de los pesos de producto terminado, para reducir las pérdidas ocasionadas por el sobrepeso.

Se plantea un diseño factorial 2^k , con 3 factores principales con 2 niveles cada uno (temperatura del horno, velocidad del extrusor y tiempo de residencia en el horno) y una covariable (humedad), con el fin de bloquear el error provocado por el cambio de las condiciones de la materia prima.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de experimentos es una herramienta estadística muy importante, empleada para inferir si el comportamiento de una variable objetivo es afectado por la alteración de uno o más factores, los cuales son controlados por un experimentador.

La industria de Alimentos preempacados está regulada por el Reglamento Técnico Centroamericano, (RTCA 01.01.11:06), el cual establece la cantidad mínima de producto permitida por unidad, por lo que no se puede distribuir lotes de productos que no cumplan dicha normativa en la región centroamericana, por otra parte, el sobre peso en los productos genera pérdidas para una empresa. En el proceso a estudiar se identifica un alto nivel de variabilidad en cuanto a los pesos de producto terminado, debido a que a pesar de tener sobrepeso en casi todas las presentaciones aún existen unidades que se acercan mucho al límite tolerado por la normativa, lo que disminuye la capacidad del mismo.

Por lo que se buscará identificar la combinación de niveles de factores que presenten los resultados con menor variabilidad y más cercanos al peso neto de cada presentación, mediante un diseño experimental 2^k para evaluar los distintos tratamientos y sus efectos mediante un Anova, y la inferencia del mejor de los tratamientos, mediante una prueba de diferencia mínima de Fisher, obteniendo las muestras a través de un muestreo sistemático para lograr abarcar corridas completas de producción en una forma más significativa, respetando los presupuestos establecidos para cada etapa.

Al poder identificar la mejor combinación de niveles o factores que presenten los mejores resultados se inferirán intervalos para establecer como nuevos límites para parámetros de producción, con lo que se espera mejorar los índices de capacidad del proceso a valores positivos mayores a 1, donde se tendría el proceso bajo control.

2. ANTECEDENTES

El mantener los estándares de calidad de un producto es de vital importancia para cualquier industria, ya que existen normativas que regulan estos estándares y en su mayoría, el cumplimiento de estos se traduce en preferencia por parte del consumidor y en una reducción de costos de producción al estandarizar los distintos procesos que intervienen en la producción.

Rojas, Hurtado y Rodríguez (2018) en su estudio diseñan y analizan un experimento empleando un diseño experimental 2^k , el cual se basa en el análisis de distintos parámetros en 2 niveles cada uno, por lo que se obtiene 2^k combinaciones de parámetros, para maximizar la viscosidad de los aceites empleados en su industria, para lo que consiguen la combinación ideal de parámetros de utilización del aceite. lo cual aporta a este estudio en la metodología, pudiendo definir niveles altos y bajos para cada parámetro de producción que influya significativamente en el peso del producto terminado.

Murugan, Mondal y Ghosh. (2009), así como Kaladhar, Subbaiah y Rao (2012), en sus estudios aplican la metodología Taguchi que consta de 8 pasos de planeación, conduciendo experimentos y evaluando resultados a medida que se avanza, con el fin de evaluar los niveles óptimos que reduzcan el ruido generado por factores incontrolables y evaluando la opción que genere la menor variabilidad en su proceso, en ambos casos se emplea para poder optimizar la forma de trabajo de las distintas maquinarias para reducir la variación y fallos en los productos elaborados, estos estudios aportan a este en cuanto a la metodología pues tomar como base la metodología Taguchi y teniendo ejemplos

prácticos de cómo llevarla a cabo servirá para el diseño del experimento.

Por su parte Lorbes, García, Milla y Díaz (2014), utilizan un análisis mediante gráficos multivariables para evaluar el efecto que cada factor aporta a la variación del producto terminado, infiriendo así los factores más influyentes dentro del estudio para enfocar sus recursos en el análisis de estos, esta misma metodología será de utilidad para evaluar la significancia que los distintos factores tienen sobre los pesos finales y su variación dentro de la línea de producción.

Desde una perspectiva distinta, Fernández, Pérez y Medina (2019), emplearon un diseño experimental de 2 factores y un análisis de varianza junto a las técnicas de *lean manufacturing* para optimizar un proceso de producción, logrando aumentar el rendimiento de la misma a partir de sus resultados, lo cual aporta a este proyecto en cuanto a la metodología, demostrando que empleando múltiples metodologías de manera conjunta, se puede llegar a resultados favorables, lo cual se espera poder aplicar para la optimización del proceso de producción, ya que se busca generar la información necesaria para poder luego aplicar metodologías como el *lean manufacturing*.

González (2014), explica el proceso que conlleva la elaboración de un experimento en la industria, detallando 4 etapas principales, mismo principio que emplean Ugurlu, Cagan y Buldum (2017) quienes emplean el Anova como metodología de análisis para su experimento, analizando el uso del magnesio en superficies metálicas para su uso industrial, empleando el pulido para reducir la aspereza del material, aplicando las mismas 4 etapas en su experimento, entre estas, empleando estas 4 etapas se puede inferir cuáles son los factores más influyentes en un problema, establecer los niveles de estas, para luego estimar el nivel de estos factores que genera el resultado más cercano al esperado y los

que presenten una menor variación en los resultados, lo cual apoya a este estudio para diseñar su estructura y metodología a seguir.

La metodología *Six Sigma* es una de las más empleadas dentro de la industria para fijar y evaluar estándares de calidad, Mireles, Estrada y Hermosillo (2015) presentan un gran ejemplo de la aplicación de esta metodología en su estudio, diseñando un experimento y evaluando los distintos factores dentro del proceso productivo que tenían una influencia negativa en la calidad del producto elaborado, así mismo Rodríguez, Molina, Fernández y Alba (2016), también demuestra como esta misma metodología se puede emplear para controlar los parámetros en la producción de nylon, siguiendo los mismo pasos que el estudio anterior, iniciando por la evaluación de parámetros para el diseño del estudio y luego procediendo a evaluar la distribución de los resultados actuales y cómo estos variaban al controlar los distintos parámetros de estudio, para lograr el ajuste de 3 desviaciones estándar en la distribución de las nuevas medias y obtener un ajuste 6 sigma, reduciendo significativamente la variación en los resultados finales de producción. Esta metodología servirá de base para el actual estudio, y es de gran ayuda el analizar cómo la misma se emplea para distintos tipos de productos y distintos tipos de procesos productivos, pudiendo ajustar los niveles de producción para reducir la variabilidad en un proceso que mantiene los estándares de calidad preestablecidos.

Por otra parte, Sandoval, Ugalde, Téllez, Vergara y Ruíz (2020) plantean en su estudio un experimento mediante el empleo de múltiples análisis de varianza, empleando los mismos factores en los mismo niveles, pero evaluando distintos efectos, y cómo la variación en un conjunto de factores puede no solo afectar el objeto de estudio en cuando al efecto que se desea investigar, sino que puede también afectar otros resultados, esto es de mucha utilidad al proyecto propuesto, debido a que en el mismo existen múltiples factores a considerar en el control de

calidad del producto terminado, y no se puede descuidar un estándar de calidad por otro, por lo que todos los estándares de calidad ya establecidos, como la humedad y dimensiones del producto terminado se deben de mantener constantes en la elaboración del estudio.

El análisis de estudios realizados, en cuanto a diseño de experimentos y optimización de procesos industriales, ponen en manifiesto que la metodología *Six Sigma* es la más empleada para alcanzar los estándares de calidad deseados en los distintos tipos de industria, observando similitudes en las metodologías empleadas para los distintos estudios, identificando los factores que mayor influencia tienen en la variable objetivo y evaluando estos en distintos niveles y combinaciones, para identificar los que presenten los resultados más favorables.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria de Alimentos preempacados, es muy importante el empleo de maquinarias que permitan la automatización del empaque de los productos, las maquinarias automáticas permiten incrementar el nivel de producción con respecto a las manuales y semi automáticas, ya que requieren de menor intervención por parte de los operarios que son los pasos que convencionalmente toman un mayor tiempo; para la dosificación de este tipo de maquinaria se emplean 3 tipos de sistemas: volumétrico, tornillo sin fin y gravimétricos, o de dosificación de pesos, siendo la maquinaria gravimétrica la más precisa para alimentos sólidos, pues su cantidad es definida por peso.

El mercado de alimentos preempacados está regulado por el Reglamento Técnico Centroamericano, (RTCA 01.01.11:06), el cual establece los requerimientos en cuanto a la cantidad de producto mínimo que se debe alcanzar para que el producto pueda ser comercializado en la región centroamericana, para los productos elaborados en esta línea, el mínimo aceptable es de 9 % por debajo del peso neto del producto, ya que se fabrica una gama de productos con pesos entre 12 y 30 gramos, así mismo, debido al incremento en el costo de producción, el sobrepeso también se convierte en un gran problema ya que reduce la productividad de una planta, al elevar los costos de producción.

Los productos elaborados en esta línea de producción son *snacks* a base de maíz, extruidos y horneados, que por su naturaleza no son uniformes en su unidad más básica, lo que dificulta establecer un volumen específico para el peso neto de cada presentación.

Durante la segunda mitad del año 2019 se ha observado que un 97 % de los productos dentro de la línea presentan sobrepeso, además de que la variabilidad de los mismos es demasiado alta, pues mediante un gráfico de dispersión se pueden ubicar actualmente unidades con peso por debajo de lo permitidos por las normativas centroamericanas, al mismo tiempo que unidades con casi el doble del peso neto del producto, por lo que el proceso está fuera de los límites del que debería ser su índice de capacidad de producción, actualmente ubicando algunos de los productos en números negativos, cuando todos para ser aceptables dentro de la metodología *Six Sigma*, deben de ser valores positivos mayores a 1.

El actual estado de los índices de capacidad del proceso indica un alto grado de variabilidad en el mismo, el cual se cree que es debido a que no se han controlado de manera eficiente los parámetros de producción, por lo que se debe identificar cuáles son los factores que influyen en la variabilidad del proceso, y conocer el efecto que cada parámetro pueda tener de manera individual y en combinación con el resto.

Esto lleva a plantear la pregunta central de esta investigación: ¿Cuáles son los rangos de parámetros óptimos que permiten disminuir la variación de los pesos finales de 2 productos en la línea de producción de alimentos extruidos y horneados, para mejorar los índices de capacidad de producción? Para ello será necesario responder a su vez las siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el tamaño de muestra óptimo que otorga una confianza al estudio del 95 %, al elaborar un muestreo aleatorio sistemático, que respete el presupuesto definido para cada etapa del estudio?

- ¿Qué factores dentro del proceso son los más influyentes en la variación de los pesos del producto terminado, para ser evaluados en 2 distintos niveles, altos y bajos, para cada uno?
- ¿Qué combinación de niveles, altos y bajos, de los parámetros de producción presenta la menor diferencia entre los pesos de producto terminado reales y los pesos netos para cada presentación de los productos a analizar?

4. JUSTIFICACIÓN

La investigación propuesta se enmarca en el campo del diseño experimental, analizando el nivel de correlación de las variables con el factor a observar, y cómo estas variables se relacionan entre sí a distintos niveles establecidos.

El factor por analizar será la media de los pesos del producto terminado de 2 distintos productos en sus diferentes presentaciones, y la medida en que los parámetros de producción afectan a su variación.

El lograr reducir la variación de los pesos de estos productos llevará a aumentar los índices de capacidad de la línea, pudiendo así reducir costos en materia prima, y aumentar la velocidad de producción al desperdiciar menor cantidad de producto por unidad, lo cual incrementará la productividad de la línea a analizar y las ganancias de la empresa.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Identificar los parámetros óptimos de producción de dos productos alimenticios a estudiar, mediante el diseño y análisis de un experimento estadístico para minimizar la variabilidad de los pesos de productos terminados y elevar los índices de capacidad del proceso, a valores positivos mayores a 1.

5.2. Específicos

- Inferir el tamaño óptimo de muestra del experimento mediante el cálculo con una técnica de muestreo aleatorio sistemático para el ajuste del costo del estudio al presupuesto establecido por la empresa.
- Identificar los factores más influyentes en la variabilidad del peso del producto terminado, mediante un análisis de varianza y los efectos que generen los distintos tratamientos, para establecer las variables bajo las cuales se realizarán las combinaciones de factores.
- Inferir, mediante una prueba de diferencia mínima de Fisher, la combinación de niveles de los distintos parámetros que presenten el peso de producto terminado con menor variación respecto a los pesos netos de cada presentación a estudiar, para definir nuevos rangos de producción que reduzcan la variabilidad en los pesos de producto terminado.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

El experimento se llevará a cabo en una empresa productora de alimentos preempacados ubicada en el departamento de Guatemala, en la línea de producción que se analizará existen distintos factores que intervienen en el proceso productivo, como la humedad de la harina cruda, la residencia y temperatura del horno y la velocidad de extrusión.

Se elaborará un muestreo preliminar para obtener los datos necesarios que permitan establecer el tamaño de muestra ideal respetando el presupuesto destinado para el estudio.

Dentro de los rangos de trabajo establecidos por el departamento de control de calidad de la empresa, se definirán dos niveles, alto y bajo, para cada variable que se evaluará en el experimento, y se analizará si estas presentan un grado de correlación significativo con respecto al peso de producto terminado.

Se analizarán los datos mediante análisis de varianza para determinar si los distintos tratamientos tienen un efecto en el peso de producto terminado, y en caso de que si tengan un efecto significativo se empleará una prueba post hoc para identificar la combinación de niveles que presente la media más cercana al peso neto de las distintas presentaciones, y que presente el menor nivel de variación del peso de producto terminado, con el fin de establecer nuevos rangos de trabajo para los parámetros de producción.

7. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presenta la base conceptual, la cual servirá como base para comprender de mejor manera el fenómeno y la metodología de experimentación, así como la interpretación de los resultados.

7.1. Diseño y análisis experimental

Los experimentos son una de las técnicas más importantes para la generación de información, analizando el comportamiento del fenómeno en estudio bajo condiciones establecidas por el experimentador.

El diseño estadístico de experimentos es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas. El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras. (Gutiérrez y Vara, 2012, p. 4)

Para el diseño de un experimento es necesaria la definición de una unidad experimental, la cual sirve como base para generar valores que permitan presentar los resultados de este.

Existen varios diseños para la elaboración de un experimento, y la selección del mejor diseño depende de 5 aspectos principales según Gutiérrez y Vara (2012): el objetivo principal, la cantidad de factores, la cantidad de niveles que se evaluarán para cada factor, los efectos a investigar, y aspectos como el costo, tiempo y precisión que se espera del experimento.

Según Gutiérrez y Vara (2012), se puede clasificar con base en estos aspectos de la siguiente manera:

- Diseños para múltiples tratamientos.
- Diseños para estudiar el efecto de distintos factores.
- Diseños para la optimización de procesos.
- Diseños para la optimización de mezclas.
- Diseños para hacer un proceso o un producto insensible a los factores que no son controlables.

7.1.1. Diseños factoriales

Los diseños factoriales de experimentos son empleados cuando en el estudio intervienen los efectos de dos o más factores, y se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de estos factores según indica Montgomery (2005).

Mediante este diseño se busca estudiar el efecto que tienen estos factores, lo que se refiere a la respuesta que se genera en el elemento de estudio, ante el cambio de los niveles de cada factor.

7.1.1.1. Diseño factorial 2^K

Este diseño de experimentos es una variante de las más utilizadas entre los diseños factoriales, ya que se emplean K factores con específicamente 2 niveles cada uno, los cuales pueden ser cuantitativos o cualitativos, y el total de las observaciones se puede obtener mediante operar $2 * 2 * 2 \dots * 2 = 2^k$, según Montgomery (2005).

Este diseño es uno de los más utilizados debido a que al tener únicamente 2 niveles es el diseño que requiere la menor cantidad de corridas u observaciones para evaluar el estudio de manera completa, y que por la misma razón los resultados que se obtendrán serán lineales, lo cual es más sencillo de analizar.

7.1.2. Análisis de varianza

Mediante la suposición de tener " α " niveles para un solo factor, los cuales se busca comparar la respuesta observada, los datos se representarían de la siguiente manera.

Tabla I. Planteamiento de un análisis de varianza de un factor

NIVEL	OBSERVACIONES				TOTALES	PROMEDIOS
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
a	y_{a1}	y_{a2}	...	y_{an}	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
					y	\bar{y}

Fuente: Montgomery. (2004). *Diseño y Análisis de experimentos*.

Donde se puede describir el modelo de la siguiente manera:

$$y_{ij} = \mu_i + \xi_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \text{ Ec. 1}$$

Donde y_{ij} representa a cada una de las observaciones, μ_i representa la media de cada nivel, y ξ_{ij} representa un error aleatorio que generan las distintas fuentes de variabilidad del experimento, las cuales incluyen, pero no se limitan a los errores en los instrumentos de medición, los generados por los elementos no controlables y las diferencias entre las unidades observadas, según Montgomery (2005).

También podemos definir que la media de cada nivel es igual a la media de la unidad estudiada, a la cual se le suma el efecto del nivel o tratamiento, como se puede apreciar en la siguiente expresión.

$$\mu_i = \mu + \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, a \text{ Ec. 2}$$

Donde τ_i se define como el efecto del nivel en la unidad de estudio y μ es la media aritmética de todas las observaciones, por lo que el modelo se puede reescribir como la siguiente expresión.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \xi_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \text{ Ec. 3}$$

Se tienen algunas suposiciones para poder elaborar este tipo de análisis, la distribución de la variable de estudio y la de los residuos del modelo deben ajustarse a una distribución normal, y las varianzas deben de ser homogéneas.

Por lo que se deben de cumplir las siguientes expresiones:

$$y_{ij} \sim N(\mu + \tau_i, \sigma^2) \text{ Ec. 4}$$

$$\xi_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \quad \text{Ec. 5}$$

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 \dots = \sigma_a^2 \text{ Ec. 6}$$

Al cumplirse estas suposiciones es posible realiza un análisis de varianza, en cualquiera de sus 3 enfoques, de efectos fijos, de efectos aleatorios o de componentes de la varianza, siendo el primero el enfoque en el cual los factores y los niveles fueron escogidos por el experimentador, y las conclusiones se aplicarán únicamente a estos factores y niveles y no pueden extenderse a tratamientos similares, mientras que en el de efectos aleatorios o componentes de la varianza los tratamientos pueden ser de una muestra aleatoria, por lo que las conclusiones pueden extenderse a otros tratamientos similares, según indica Montgomery (2005).

El objetivo principal de un análisis de varianza es el de dar a conocer si el cambio en los factores genera una variación en el estudio, o si su comportamiento es determinado por factores aleatorios o no controlados, por lo que se plantea la siguiente hipótesis nula e hipótesis alterna respectivamente.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_i = \mu_a$$

$$H_a : \mu_i \neq \mu_j; \text{ para al menos un par de niveles o tratamientos.}$$

Lo cual significa que la media de al menos uno de los tratamientos no será igual a la del resto de tratamientos.

Al calcular la media de todo el conjunto de datos, y mediante un análisis algebraico, se puede demostrar que la media del conjunto de datos será igual a la media de cada media muestral, resultando una expresión como la siguiente.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^I J_i \bar{X}_i}{N} \text{ Ec. 7}$$

La variación de las medias muestrales alrededor de la gran media muestral se mide por una cantidad que se llama suma total de cuadrados del tratamiento

$$SSTr = \sum_{i=1}^I J_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 \text{ Ec. 8}$$

Cuyos términos son basados en la distancia de cada media muestral, con respecto a la media del conjunto de todos los datos, la cual para poder evaluar si es lo suficientemente grande como para rechazar la hipótesis nula, se debe comparar con otra suma de cuadrados, pero será la suma del error, *SSE*, la cual está dada por la siguiente expresión.

$$SSE = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} (\bar{X}_{ij} - \bar{X}_j)^2 \text{ Ec. 9}$$

Sabiendo que a $(\bar{X}_{ij} - \bar{X}_j)$ se le denomina residuos, se puede indicar que el *SSE* es la suma cuadrática de estos residuos, los cuales únicamente dependen de la distancia entre cada una de las distintas observaciones y la media del nivel en que se encuentran dichas observaciones, por lo cual, el *SSE* únicamente mide la variación aleatoria del proceso estudiado.

Los estadísticos para realizar el análisis de la varianza se denominan la media cuadrática del tratamiento y la media cuadrática del error, y se pueden obtener mediante las siguientes expresiones respectivamente.

$$MSTR = \frac{SSTR}{I-1} \text{ Ec. 10}$$

$$MSE = \frac{SSE}{N-1} \text{ Ec. 11}$$

Donde $(I - 1)$ y $(N - 1)$ representan los grados de libertad, y estos estadísticos se pueden interpretar de la siguiente manera según Navidi (2006).

$$MSTR = \sigma^2 \text{ Cuando } H_0 \text{ es verdadera}$$

$$MSTR > \sigma^2 \text{ Cuando } H_0 \text{ es falsa}$$

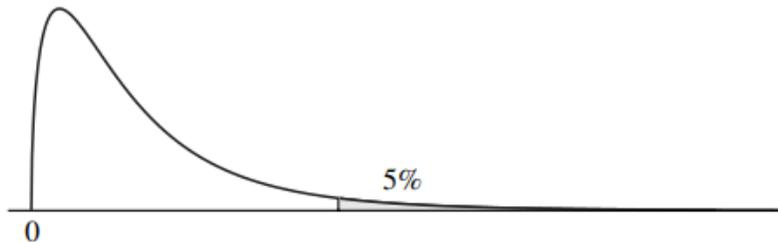
$$MSE = \sigma^2 \text{ Cuando } H_0 \text{ es o no es verdadera}$$

Y debido a que estas son varianzas y cuando H_0 es verdadera $MSTR$ y MSE deben de ser relativamente iguales, es posible aplicar una prueba de varianza y el cociente de esta deberá ser 1, en el caso que H_0 sea verdadera, pudiendo calcular el estadístico de esta prueba de la siguiente manera.

$$F = \frac{MSTR}{MSE} \text{ Ec. 12}$$

Realizando un ajuste a la distribución de Fisher, con $(I - 1)$ y $(N - 1)$ grados de libertad, lo cual se denota como $F_{I-1, N-1}$, cuyo resultado debe ser igual a 1 en caso de ser verdadera H_0 , o el resultado debe de ser mayor a 1, en caso de ser falsa; la distribución de Fisher toma la siguiente forma.

Figura 1. **Distribución de Fisher con $\alpha = 5\%$.**



Fuente: Navidi. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*.

7.1.3. Contrastes para medias de experimentos multivariantes

Como resultado el análisis de varianza nos indicará si se acepta o no su hipótesis nula, y en el caso en que esta sea rechazada, se sabrá que por lo menos una de las medias de los distintos niveles o tratamientos no es igual al resto, pero no se podrá identificar cual o cuales son distintas al resto, por lo que se emplean distintos métodos posteriores para realizar este análisis, entre ellos podemos mencionar el método de la diferencia mínima significativa de Fisher, el método Tukey-Kramer para comparaciones múltiples, y el método Bonferroni para comparaciones múltiples, según nos indica Navidi (2006).

7.1.3.1. Método de diferencia mínima significativa de Fisher

La diferencia mínima de Fisher, también conocida como la prueba t protegida, pues se basa en el uso de la t de Student, empleando la media cuadrática intergrupales como estimador de la varianza poblacional.

Dadas dos medias muestrales \bar{X}_i y \bar{X}_j , se puede calcular el estadístico de la siguiente manera, debido a que se desea probar la hipótesis nula $H_0: \mu_i - \mu_j = 0$, lo cual indica una diferencia de medias.

$$t = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_j}{\sqrt{MCE\left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}\right)}} \text{ Ec.13}$$

El cual se acerca en cuanto a su distribución a una distribución t de Student con $(N - n)$ grados de libertad, donde N es el total de las observaciones y n es la cantidad de tratamientos, y en caso de que se cumpla esta expresión:

$$|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > t_{N-1, \alpha/2} \sqrt{MCE\left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}\right)} \text{ Ec.14}$$

Entonces se rechaza H_0 al nivel α , según nos indica Navidi (2006)

7.1.3.2. Método de Tuckey-Kramer para comparaciones múltiples

Este método se basa en la distribución de rango studentizado, y no en la distribución t de Student, esta distribución de rango tiene dos valores de grados de libertad, los cuales están dados por I y $(N - 1)$, denotándose como $q_{N-1, \alpha}$ con lo que se puede calcular intervalos de confianza con un nivel de confianza $100 * (1 - \alpha)\%$, para todas las diferencias $\mu_i - \mu_j$, de la siguiente manera.

$$\bar{X}_i - \bar{X}_j \pm q_{N-1, \alpha} \sqrt{\frac{MCE}{2} \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}\right)} \text{ Ec.15}$$

Luego de obtener las diferencias de medias para cada i y j , se calcula el siguiente estadístico con el fin de probar la hipótesis nula $H_0: \mu_i - \mu_j = 0$

$$t = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_j}{\sqrt{\frac{MCE}{2} \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)}} \text{ Ec.16}$$

El P-valor de las pruebas se puede encontrar al consultar la distribución de rango studentizado, y para cada pareja de niveles i y j , para los que se cumpla la siguiente expresión:

$$|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > q_{N-1, \alpha} \sqrt{\frac{MCE}{2} \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)} \text{ Ec.17}$$

La hipótesis nula es rechazada, en un nivel α , como indica Navidi (2006)

7.1.4. Covariables

Una Covariable según Montgomery (2004) es una variable que existe y se relaciona de manera lineal con la variable objetivo, pero esta no puede ser controlada por el experimentador, pero puede ser observada junto a la variable objetivo, la cual puede inflar el error cuadrático medio del error, y así dificultar el procedimiento para identificar los efectos de los distintos tratamientos.

El análisis de covarianza implica el ajuste de una variable perturbadora que no puede ser controlable.

El modelo estadístico apropiado para el análisis entre la respuesta y la covariable sería el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta(X_{ij} - \bar{X}) + \xi_{ij} \left\{ \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{matrix} \right. \text{ Ec.18}$$

Donde las distintas variables representan los mismos factores que en la ecuación 3, X_{ij} representa es la medición de la covariable para la observación y_{ij} , \bar{X} es la media de los valores de X_{ij} , y β representa el coeficiente de regresión lineal que indica la dependencia de X_{ij} , y_{ij} y ξ_{ij} , donde β es estimando mediante los errores cuadráticos de cada una de las variables, y se relacionan de la forma siguiente:

$$\beta = \left\{ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n [(x_{ij} - \bar{x}_i) * (y_{ij} - \bar{y}_i)] \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \right\} \text{ Ec.19}$$

Y este efecto pretende reducir la inflación de los errores cuadráticos medios, mejorando el modelo.

7.1.5. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Esta es una prueba de bondad de ajuste, lo que significa que se interesa por el grado de ajuste entre la distribución de las observaciones y una distribución teórica, mediante la comparación de la distribución de las frecuencias acumuladas de la distribución teórica contra la distribución de las frecuencias acumuladas de las observaciones según Siegel y Castellan (1995).

Por lo que teniendo una función $F_0(X)$, que es una función de frecuencias acumuladas, la cual está dada por una distribución teórica, según la hipótesis nula que se propone, para cualquier valor de X , el valor de dicha función $F_0(X)$, será igual a la proporción de casos menores o iguales a X , y teniendo una función $S_N(X)$, la cual es la distribución de frecuencias de una serie de observaciones ,

entonces $S_N(X_i)$ nos indicará la proporción de valores iguales a X_i , con respecto al total de observaciones; por lo que al cumplirse la hipótesis nula, la distribución de frecuencias $S_N(X)$, debería ser igual a $F_0(X)$.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov está enfocada en las máximas desviaciones entre las dos distribuciones de frecuencias, por lo que se debe de buscar el máximo absoluto de la diferencia para las distintas X_i , la cual será denominada D,

$$D = \max |F_0(X_i) - S_N(X_i)| \quad i = 1, 2, \dots, N \quad \text{Ec. 20}$$

La cual se comparará con valores críticos los cuales dependen de N , y se obtienen de las tablas específicas de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov; y cuando $D < Valor\ crítico$, entonces se considera significativa, o H_0 se considera como verdadera.

7.1.6. Muestreo sistemático

El muestreo sistemático es una técnica de muestreo en la que se procede seleccionando de manera aleatoria el primer elemento y después cada k-ésimo elemento según Mendenhall, Scheaffer y Lyman (2006).

Esta técnica proporciona una opción útil para la realización de un muestreo debido a su simplicidad, pues es fácil de planificar y de llevar a cabo, por lo que el error proveniente de los investigadores es menor y proporciona más información por unidad de costo que otros tipos de muestreo, ya que proporciona información de una población de manera uniforme.

Para poder determinar el valor de la cantidad de unidades de separación entre cada muestra k , se debe de conocer de antemano el tamaño de la población N y el tamaño de la muestra n , y se determina de la siguiente manera.

$$k = \frac{N}{n} \text{ Ec. 21}$$

7.2. Mejora continua de procesos

La mejora continua de procesos se basa en la aplicación de técnicas de documentación y evaluación de procesos para su constante ajuste con el fin de la calidad de un producto o servicio, “Existen 2 componentes principales para la mejora continua: el monitoreo y el ajuste, el monitoreo es acerca de la medición y el rastreo y el ajuste acerca del cambio.” (Guerra, 2007, p. 193).

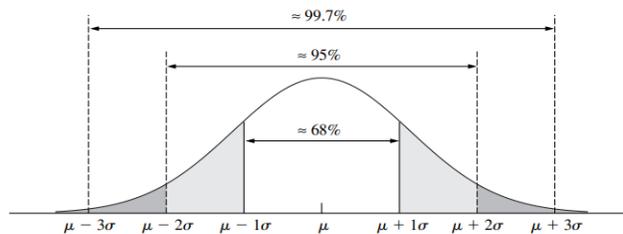
Según Cuatrecasas y González (2017) la calidad se define como el conjunto de características que debe poseer un producto o servicio, así como el nivel de satisfacción de necesidades de los consumidores, por lo que el producto o servicio debe de cumplir con un conjunto de características mínimas bajo las que fue diseñado, a los cuales se les llama estándares.

Existe una gran variedad de herramientas que se pueden emplear para la mejora continua de la calidad de un producto o servicio, entre las que cabe mencionar el método de Deming, el método Taguchi, control estadístico de procesos, cartas de control, entre otras, las cuales buscan crear información acerca del comportamiento de un producto o proceso para facilitar el tomar decisiones para su ajuste.

7.2.1. Metodología seis sigma

La metodología Seis Sigma es un sistema de calidad que busca alcanzar un rendimiento sostenido, mediante la reducción de la variabilidad de los procesos, incrementando así la capacidad de los mismos; esta metodología lleva este nombre debido a que, en una distribución normal, casi todos los sucesos se encuentran incluidos en seis veces la desviación estándar, sigma, ya que tan solo de 3 a 4 sucesos se encontrarán fuera de este intervalo según Miranda, Chamorro y Lacoba (2007).

Figura 2. **Desviaciones estándar en una distribución normal**



Fuente: Navidi. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*.

Dependiendo de la conformidad obtenida por los parámetros reales de fabricación con respecto a los deseados, se pueden asignar niveles según la conformidad real del proceso, los cuales van desde 1 sigma, hasta 6 sigma, y mientras más cercano se encuentre a 6 sigma, mejor es la calidad del proceso estudiado.

En un proceso existen dos tipos de variación, las asignables, las cuales son originadas por la falta de control de alguno de los elementos principales del proceso, y las aleatorias, las cuales son variaciones normales y no originan que el producto se pueda considerar fuera de control, según Aleu (2003).

7.2.1.1. Índices de capacidad de procesos

Los índices de capacidad son empleado para contrastar las medidas de tendencia central reales de un proceso contra las especificaciones del mismo, la capacidad del proceso es una medida de la distribución real de la variable bajo la que se mide la calidad de un producto o servicio según Verdoy, Mateu, Sagasa y Sirvent (2006).

Para poder cuantificar la capacidad de un proceso se emplean principalmente 2 índices de capacidad, C_p y C_{pk} .

El C_p es el índice de capacidad potencial continua de un proceso, y este indica que tan estrecha es la distribución de frecuencias de los resultantes de un proceso, con respecto a las tolerancias especificadas para este, empleando 6 veces la desviación estándar como la distribución de la totalidad de los datos, distribuidos de una forma simétrica con respecto a la media; es calculado mediante la expresión:

$$C_p = \frac{LSE-LIE}{6\sigma} \text{ Ec. 22}$$

Donde LSE representa al límite superior de especificación y LIE al inferior.

El Cpk expresa una razón entre las tolerancias del diseño, o especificaciones, de un proceso con respecto a la tendencia central real del proceso, por lo que se evalúan los 2 límites, superior e inferior, de tolerancias con respecto al valor medio, y se emplea el valor mínimo entre estos, lo cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Cpk1 = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad \text{Ec. 23}$$

$$Cpk2 = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad \text{Ec.24}$$

Y se toma el menor valor de estos resultados como el índice de capacidad Cpk .

Para interpretar estos índices de capacidad se emplean los siguientes criterios, si el Cp es mayor al Cpk , significa que el proceso no se encuentra centrado, únicamente al ser aproximadamente iguales.

Tabla II. **Interpretación de índices Cp y Cpk**

Valor Cp	Valor Cpk	Interpretación
≥ 1.33	≥ 1.33	Proceso correcto
$1.33 \geq Cp \geq 1$	$1.33 \geq Cpk \geq 1$	Proceso bajo vigilancia, se necesita disminuir la dispersión y centrar el proceso
< 1	< 1 y $Cpk < Cp$	Proceso no capaz

Fuente: Socconini (2020). *Lean Six Sigma Green Belt. Manual de certificación.*

7.3. Proceso de producción de *Snacks* extruidos y horneados

Los *snacks* son alimentos preempacados, en cantidades pequeñas listos para su consumo, los cuales pueden catalogarse en 2 grandes grupos: los salados y los dulces, los cuales a su vez se pueden dividir en variedades según su proceso de producción, como los *snacks* horneados, deshidratados, fritos, extruidos y horneados, extruidos y fritos, entre otros.

El proceso de producción de los alimentos extruidos y horneados de la empresa cuenta con cuatro etapas principales, extrusión, horneado, aplicación de sabor y empaçado.

7.3.1. Extrusión

El proceso de Extrusión es un método de moldeo de materiales para su expansión mediante fuerzas mecánicas y transmisión energética,

El proceso de extrusión consiste en el moldeo o conformación de una sustancia blanda, o plástica, mediante la aplicación de calor y de fuerzas de fricción mecánica, hasta hacerla pasar por un orificio, cuya forma especial proporciona al producto final una textura y unas características determinadas. (Bello, 2000, p. 34)

La maquinaria empleada para este proceso es llamada extrusor, la cual se alimenta de una mezcla de harinas de maíz, agua y otras materias primas para formar una masa, y mediante presión, expandirla, darle forma y cortar en unidades el producto.

7.3.2. Horneado

Un horno es un tipo de maquinaria de sistema abierto que permite transmitir calor mediante el movimiento de aire a diferentes temperaturas en su interior, su principal función es la cocción de algún producto.

Por su forma existen los hornos verticales y los horizontales; y por su funcionalidad existen los hornos de gas, eléctricos, rotativos y microondas.

7.3.3. Aplicación de sabor

El proceso de aplicación de sabor inicia con una olla de mezcla, donde se elabora el saborizante, denominado *Slurry*, el cual luego alimenta un aplicador de sabor, el cuál es una cámara cilíndrica giratoria, en forma de tambor que mediante gravedad y un movimiento giratorio aplica el *Slurry* en la superficie del producto.

El producto con sabor ya aplicado luego es transportado mediante bandas que cumplen no solo la función de transporte, pues además cumplen la función de enfriamiento del producto para que este no libere vapores luego de ser empacado.

7.3.4. Empaque

El proceso de empaque es la última etapa del proceso productivo de alimentos preempacados, el cual puede ser un proceso automatizado, manual o mixto.

Existen distintos tipos de maquinarias de empaque, por su disposición, pueden ser verticales y horizontales, por su equipo de dosificación pueden ser volumétricas, las cuales emplean vasos con un volumen ajustable, los cuales giran en una plataforma circular denominada plato, y mediante el uso de cepillos fijos se retira el exceso del producto, para luego ser depositadas estas cantidades en los empaques, de tornillo sin fin, que generan un flujo constante de producto y mediante ese flujo se realiza el llenado de las unidades, basados en tiempos de llenado promedio, y existen maquinarias de empaque con dosificación gravimétrica, las cuales emplean una serie de básculas para la medición del producto y la dosificación de las unidades, lo cual las hace las más exactas cuando las unidades de medida para el producto son dadas por el peso neto y no por una cantidad de volumen.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

2. MARCO TEÓRICO

- 2.1 Diseño y análisis experimental
 - 2.1.1 Diseños factoriales
 - 2.1.1.1 Diseños factorial 2k
 - 2.1.2 Análisis de varianza
 - 2.1.3 Contrastes de medias para experimentos multivariantes
 - 2.1.3.1 Método de diferencia mínima significativa de Fisher
 - 2.1.3.2 Método Tukey-Kramer para comparaciones múltiples
 - 2.1.4 Covariables
 - 2.1.5 Muestreo Sistemático

- 2.2 Mejora continua de procesos
 - 2.2.1 Metodología seis sigma
 - 2.2.1.1 Índices de capacidad de procesos
- 2.3 Proceso de producción de snacks extruidos y horneados
 - 2.3.1 Extrusión
 - 2.3.2 Horneado
 - 2.3.3 Aplicación de sabor
 - 2.3.4 Empaque

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo ya que la información será recolectada por herramientas de medición en escalas continuas, para posteriormente ser analizada, y no dependerá de ningún factor subjetivo.

El alcance es correlacional, dado que busca inferir el grado de influencia que múltiples variables independientes tienen sobre una variable objetivo para poder estimar los valores que presenten los mejores resultados, con el fin de minimizar la variabilidad del peso del producto terminado.

El diseño adoptado será experimental, pues las condiciones de los parámetros del proceso productivo a analizar serán manipuladas estableciendo estas en valores preestablecidos en 2 distintos niveles cada una, para poder analizar el comportamiento que la variable objetivo presenta ante el cambio de dichos estados.

9.2. Unidades de análisis

La población de estudio estará conformada por las unidades de producto terminado de una línea de producción de alimentos preempacados, la cual se

encuentra dividida en subpoblaciones dadas por las distintas presentaciones de cada producto, de las cuales se extraerán muestras de manera aleatoria sistematizada, para poder obtener muestras a través de distintas instancias temporales de la producción, que serán estudiadas en su totalidad.

9.3. Variables

Los datos empleados en el presente estudio son de carácter cuantitativo, por lo que a continuación se definen las variables a emplear en el estudio con sus respectivas escalas.

Tabla III. **Variables de estudio**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Peso (W)	Fuerza gravitacional que ejerce la tierra sobre cada unidad de producto terminado.	Empleando básculas para la medición del peso de las distintas unidades muestreadas, el peso será tomado en gramos y es una escala de razón, con 2 decimales
Temperatura (T)	Cantidad de energía cinética de las partículas dentro del horno.	La temperatura por medir será la del horno, mediante sensores que el mismo posee en su interior, en una escala de grados Fahrenheit, la cual es una escala de intervalos.

Continuación tabla III.

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Tiempo de Residencia (<i>R</i>)	La cantidad de tiempo que un el producto pasa dentro del horno.	La residencia en horno se establece en los parámetros de este, y se mantiene constante durante el proceso, esta se mide en segundos, en una escala ordinal.
Velocidad de Extrusor (<i>Ve</i>)	Cantidad de producto extruido en un periodo de tiempo determinado	La cantidad de masa que se procesa en el extrusor es establecida en los parámetros de este, la cual se mide en Kg/h, en una escala ordinal.
Humedad (<i>h</i>)	Porcentaje de agua presente en la harina empleada para la extrusión.	El porcentaje de humedad presente en la harina no puede ser controlado, únicamente medido, a través de una termobalanza, el cual se da en un valor porcentual.

Fuente: elaboración propia.

9.4. Fases del estudio

A continuación, se describirán las distintas fases del estudio

9.4.1. Fase 1: revisión de literatura

Inicialmente se elaborará una recopilación y análisis de información bibliográfica que será de uso para la realización del estudio, desde el análisis de experimentos con enfoques y metodologías similares a la planteada, y el análisis de metodologías de mejora continua de procesos, ya que se busca tener una

visión más amplia de cómo abordar la problemática, y encontrar las herramientas que mejor se adapten para el diseño del estudio y la recolección de los datos. Además de analizar estudios previos será de suma importancia estudiar teoría relacionada con la problemática, para entender de mejor manera el fenómeno y las técnicas de experimentación, para poder elaborar un mejor análisis de resultados.

9.4.2. Fase 2: estudio preliminar y determinación de tamaño de muestra

Se procederá a realizar un muestreo preliminar, el cual permitirá inferir los valores de desviación estándar, y demás estadísticos necesarios para poder calcular el tamaño de muestra óptimo para el estudio, el cual se definirá bajo un muestro sistemático, bajo un presupuesto predefinido por la empresa.

9.4.3. Fase 3: recolección de la información

Se procederá a generar información para el estudio mediante el muestreo sistemático a lo largo de la totalidad de un ciclo de producción para cada presentación de los 2 distintos productos, se espera poder recolectar dicha muestra a lo largo de 1 mes, tomando en cuenta las 3 variables independientes en 2 niveles distintos cada una, una variable dependiente y una covariable, la cual es la humedad de la materia prima, ya que esta no puede ser controlada en su totalidad, únicamente medida.

Las muestras por tomar serán respecto a la combinación de distintos niveles de factores de producción mediante un diseño experimental 2^k , por lo que se contará con un total de 8 tratamientos para cada presentación, planteando el estudio de la siguiente manera con niveles altos (+) y bajos (-).

Tabla IV. **Diseño de tratamientos propuesto**

Nivel	Tratamiento	Totales	Promedios
1	A+B+C+	$y_1.$	$\bar{Y}_1.$
2	A+B+C-	$y_2.$	$\bar{Y}_2.$
3	A+B-C+	\vdots	\vdots
4	A+B-C-	\vdots	\vdots
5	A-B+C+	\vdots	\vdots
6	A-B+C-	\vdots	\vdots
7	A-B-C+	\vdots	\vdots
8	A-B-C-	$Y_8.$	$\bar{Y}_8.$
		y	\bar{y}

Fuente: elaboración propia.

9.4.4. Fase 4: análisis de información

Una vez recolectados los datos necesarios, se procederá a analizar si los tratamientos tienen un efecto significativo sobre el peso del producto terminado mediante un análisis de varianza y los gráficos de efectos de cada factor, en caso de que, se observe un efecto significativo, se inferirá el tratamiento que presente los mejores resultados mediante una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher.

9.4.5. Fase 5: interpretación de información

Al tener el tratamiento que presente los mejores resultados, se procederá a diseñar los nuevos límites para los parámetros de producción mediante los intervalos de confianza de los niveles de los distintos parámetros, que

establecerán los rangos de producción aceptables, que reduzcan los niveles de variabilidad actual, para aumentar así la capacidad del proceso.

9.4.6. Fase 6: redacción del informe final

Los resultados serán plasmados en un informe final, incluyendo gráficos de efectos y demás metodologías de análisis, así como las conclusiones y recomendaciones alcanzadas con el proyecto.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Las técnicas estadísticas por emplear son:

- Pruebas de normalidad: se empleará una prueba de Kolmogoron-Smirnov para inferir si la distribución de los pesos de producto terminado y de los residuos del análisis de varianza se ajustan a una distribución normal, ya que esto determinará si es posible emplear técnicas paramétricas para el análisis de los datos.
- Técnicas de muestreo: se definirá el tamaño de muestra ideal, que permitirá obtener información de corridas completas de producción, obteniendo las muestras mediante el uso de una técnica de muestreo sistemático, de manera que se pueda analizar todos los distintos lotes de materia prima empleados en una corrida de producción, tomando una muestra inicial de forma aleatoria y de las siguientes muestras separadas una cantidad de tiempo predefinida después de la inicial.
- Análisis de varianza: se utilizará un análisis de varianza para identificar si entre las distintas combinaciones de los 2 niveles de parámetros de producción se identifica que todos los grupos cuentan con medias iguales o por lo menos un subgrupo con media distinta al resto, mediante la comparativa de la varianza dentro de las observaciones de cada tratamiento y la varianza entre los distintos tratamientos mediante una prueba de Fisher.

- Pruebas post hoc: mediante una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher, se identificará que tratamientos presentan valores de medias iguales, y cuales presentan medias distintas entre sí, además de cuál de estos tratamientos presenta los mejores resultados con respecto al peso neto de la presentación a analizar, lo que permitirá identificar los niveles ideales de los distintos factores analizados.

11. CRONOGRAMA

Tabla V. Cronograma de actividades

Fases /Semana	1	2	3	8	9	10	11	12	13	14
Fase 1: revisión de la literatura.										
Fase 2: estudio preliminar y determinación de tamaño de plan de muestreo										
2.1. Muestreo preliminar										
2.2. Análisis de datos preliminares										
2.3. Diseño de plan de muestreo										
Fase 3: recolección de la información										
3.1. Elaboración de experimento y toma de muestras del producto A										
3.2. Elaboración de experimento y toma de muestras del producto B										
Fase 4: análisis de la información										
4.1. Análisis de varianza para productos A y B.										
4.2. Elaboración de pruebas post hoc.										
4.3. Elaboración de gráficos de efectos de tratamientos.										

Continuación tabla V.

Fase 5: interpretación de la información											
5.1. Análisis de resultados de prueba post hoc.											
5.2. Interpretación de los efectos de los tratamientos											
5.3. Inferencia de intervalos de confianza para los parámetros de producción como rangos aceptables de producción.											
Fase 6: informe final											
Tiempo total:	14 semanas										

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación contará con la participación del estudiante y con un asesor, los cuales realizarán sus funciones en el desarrollo del experimento *ad honorem*.

Tabla VI. **Recursos necesarios para la investigación**

Elemento	Unidad	Costo Unitario/(Q.)	Cantidad necesaria	Costo /(Q.)
Fase: estudio preliminar y recopilación de la información				
Balanza			1	0.00
Termo balanza			1	0.00
Computadora portátil			1	0.00
Bolsas para desechos	paquete	33.75	2	
Fase: interpretación de la Información				
Software R y R Studio			1	0.00
Software InfoStat			1	0.00
Software Excel			1	0.00
Fase: informe final				
Papel	Resma	34.50	2	69.00

Fuente: elaboración propia.

Se requerirán una *laptop*, empleada por el tesista, una báscula y una termobalanza, empleadas para la recolección de datos del experimento, las cuales se poseen por parte de la empresa, además de requerir del uso de

software para el análisis de los datos, los cuales presentará un coste cero, pues se emplearán softwares de código abierto o versiones para estudiante

13. REFERENCIAS

1. Aleu, F. (2003). *Seis Sigma Para Gerentes y Directores*. Barcelona: Libros En Red.
2. Cuatrecasas, L. y González, J. (2017). *Gestión Integral de la calidad*. Barcelona, España: Profit.
3. Fernández, S., Pérez, A., y Medina, P. (2019). Uso integral de simulación, diseño de experimentos y KANBAN para evaluar y mejorar el rendimiento de una línea de producción. *Entre Ciencia E Ingeniería*, 13(26), 9-16. doi: 10.31908/19098367.1147
4. González, I. (2014). Diseño de experimentos y su aplicación en la industria. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún*, 1(1). doi: 10.29057/ess.v1i1.1340
5. Guerra. I. (2007). *Evaluación y Mejora Continua. Conceptos y herramientas para la medición y mejora del desempeño*. Bloomington, Indiana: Author House.
6. Gutiérrez H., y Vara R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos: Humberto Gutiérrez Pulido y Román de la Vara Salazar*. México D.F.: McGraw-Hill.

7. Gutiérrez, J. (2000). *Ciencia bromatológica, principios generales de los alimentos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
8. Kaladhar, M., Subbaiah, K. V., y Rao, C. S. (2012). Determination of Optimum Process Parameters during turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steels using Taguchi method and ANOVA. *International Journal of Lean Thinking*, 3(1). Recuperado de https://journaldatabase.info/articles/determination_optimum_process.html
9. Lorbes, J., Garcia, Y., Milla, M., y Diaz, L. (2014). Análisis discriminante canónico con técnicas gráficas multivariadas aplicado a un diseño con dos factores. *Investigación En Ingeniería*, 11(2), 38–47. doi: 10.18041/1794-4953/avances.2.227
10. Mendenhall, W. Scheaffer, R. y Lyman, R. (2006). *Elementos del muestreo*. México: Editorial Paraninfo.
11. Miranda, F., Chamorro, A., y Lacoba, S. (2007). *Introducción a la gestión de la calidad*. España: Delta, Publicaciones Universitarias.
12. Mireles, L., Estrada, F., y Hermsillo, F. (2016). Análisis y mejora de un proceso mediante la aplicación de un enfoque Lean Six Sigma. *Cultura Científica y Tecnológica*, 0(57). Recuperado de <http://erevistas31.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/850>

13. Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de experimentos*. México D.F.: Editorial Limusa.
14. Murugan, B., Mondal, B., y Ghosh, S. (2009). Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 68(08), 686-695. Recuperado de <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/5301>
15. Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. México D.F.: McGraw-Hill.
16. Rodriguez, M., Molina, J., Fernández, L., y Alba, N. (2016). Aplicación de la Metodología Seis Sigma para controlar los parámetros significativos en la producción de un guante de Nylon con recubrimiento de Látex. *Cultura Científica y Tecnológica*, 0(58). Recuperado de <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/1436>
17. Rojas, L., Hurtado, J. y Rodríguez, H. (2018). Análisis de Viscosidad en Lubricantes Mediante diseño factorial con tres factores. *Innovation in Education and Inclusion: Proceedings of the 16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. doi: 10.18687/LACCEI2018.1.1.43
18. Sandoval, T., Ugalde, L., Téllez, A., Vergara H., y Ruiz, D. (2020). Análisis Estadístico en Aplicación de Soldadura GTAW Usando Diseño de Experimentos Factorial Completo, *Soldagem & Inspeção*, 25. doi: 10.1590/0104-9224/SI25.16

19. Siegel, S., y Castellan, N. (1995). *Estadística No Paramétrica, Aplicada a ciencias de la conducta*. México: Editorial Trillas, S.A.
20. Socconini, L. (2020). *Lean Six Sigma Green Belt. Manual de certificación*. España: Marge Books.
21. Ugurlu, M., Cagan, S., y Buldum, B. (2017). Improvement of Surface Roughness using ANOVA for AZ31B Magnesium Alloy with Ball Burnishing Process. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(9), 216–221.
22. Verdoy, P., Mateu J., Sagasta, S. y Sirvent, R. (2006). *Manual de control estadístico de calidad: teoría y aplicaciones*. España: Universitat Jaume I.