

Factores predictores del porcentaje de humedad en proteína de soya texturizada: identificación y control

Egan Moreno¹, Raúl Rodríguez¹, Brenda Piedra²

Departamento de Control de Calidad de Alimentos Colpac S.A de C.V²

Facultad de Ingeniería y Tecnología¹

67530

egan.moreno@gmail.com¹

Abstract—La proteína de soya texturizada (PST) es un alimento que tiene gran demanda como sustituto de la proteína de origen animal. Con el fin de optimizar el proceso de elaboración de la proteína PST, basado en extrusión y secado. Se realizaron estudios de calidad empleando herramientas Seis Sigma. Se evaluó el proceso para identificar causas de variabilidad asignables por medio de cartas de control de Shewart para mediciones individuales. Se validó el sistema de medición de la variable de respuesta, Porcentaje de Humedad de la Proteína de Soya Texturizada (PHPST), por medio de un estudio R&R Crossed. La identificación de los factores predictores que afectan al PHPST se efectuó por medio de regresión lineal múltiple. La optimización de los parámetros de operación de proceso se realizó por medio de Operación Evolutiva (EVOP). Se encontró evidencia de que la cantidad de agua añadida, temperatura del horno y el porcentaje de aceite en pasta resultaron predictores del PHPST.

Index Terms— soya, superficie de respuesta, regresión lineal, diseño de experimento, extrusión termoplástica.

I. INTRODUCCIÓN

LA implementación del uso de la PST ha crecido considerablemente en los últimos años debido a los beneficios que se han encontrado en el alimento, donde Estados Unidos gasta aproximadamente 186,000 millones de dólares por año en la industria de la PST.

De acuerdo con la reciente encuesta de NPR (National Public Radio), el 39% de los estadounidenses están reduciendo el consumo de carne, principalmente por razones de salud; además de que las ventas han aumentado un 250% desde 2013 hasta 2014[1].

Se han realizado diversas investigaciones en favor de los beneficios que este producto atribuye, entre las cuales resaltan la pérdida de peso y la digestión que se genera en su consumo [2].

Algunos de los beneficios en el control de las sustancias volátiles (humedad) son aumentar su vida útil, mejorar la

calidad, simplificación del manejo, almacenamiento y transporte del mismo [3].

Los factores que más han intervenido en el mercado de la PST ha sido la gran variedad de productos disponibles en el mercado. Se estima que la cantidad de productos que contienen soya es mayor a 2000; casi 1 de cada 4 productos contiene soya; entre los cuales se destacan los embutidos, hamburguesas, surimi, bases para sopas, alimentos para lactantes, sustitutos de leche, entre otros [4].

La extrusión es un proceso importante que ha sustituido métodos tradicionales en la creación de alimentos. Dentro de los productos tratados en la extrusión se encuentran los cereales, legumbres, frutas y combinaciones de varios productos. [6] Entre las diferentes técnicas de conformación, la extrusión es una de las técnicas más importantes utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones, el cual es atractivo por el hecho de ayudar en el ahorro de energía, materiales, mejora de calidad y el desarrollo de propiedades homogéneas en todo el componente [5].

La extrusión en alimentos requiere de control en muchas variables como la humedad aplicada a la mezcla, la composición del material, el tamaño de las partículas, la velocidad de avance, la temperatura del barril, la velocidad del husillo, la colocación del tornillo y geometría de los troqueles. Esto puede llegar a producir variaciones en la calidad de los materiales extruidos y una de las herramientas para entender el comportamiento de las variables es la superficie de respuesta (RSM) [6].

Es por eso que la compañía interesada pretende mejorar sus condiciones de trabajo para lograr un control dentro del proceso y su producto final sea el adecuado. Tomando como incógnitas los principales predictores que afecten el PHPST y los valores de los predictores para lograr un PHPST más óptimo.

Para ello se realizaron estudios como Gage R&R Study Crossed, estudio más utilizado en los análisis de sistemas de medición (MSA) el cual se divide en dos secciones importantes, repetibilidad y reproducibilidad [7]. Al igual se utilizaron tablas de control, las cuales presentan límites, los cuales se determinan antes de correr el estudio, utilizando algunos rangos que se identifiquen de calidad dentro del proceso a estudiar [8].

B.Piedra Jefe de departamento de Control de Calidad en la compañía Alimentos Colpac S.A de C.V . b.piedra@colpac.com.mx

Instructor R. Rodríguez, como investigador del centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Morelia en el área estadística. r.rodriguez@gmail.com

Durante la segunda etapa de la investigación se estudió la primera incógnita que fue el encontrar los predictores más significativos en el trato del PHPST, para ello fue necesario el uso de un modelo de regresión lineal múltiple, al cual se recurre muchas veces en estudios científicos para encontrar los factores que más intervienen en la variable estudiada [9].

En la parte final de la investigación se utilizó un diseño de experimentos llamado Operación Evolutiva (EVOP), el cual entra dentro de los estudios de superficies de respuesta, y el cual se trabajó minuciosamente en la producción estudiando las dos variables más significativas: X1: cantidad de agua añadida (ml), X2: temperatura del horno (°C). Con las cuales se llegó a un área más óptima para el control del PHPST [10].

II. METODOLOGÍA

a. Metodología del estudio R&R

El sistema de medición del PHPST lo conforman el instrumento (Moisture Determination Balances - A&D 4714A), y los operadores del instrumento. Se disponen de cuatro operadores y un instrumento de medición.

Las mediciones del PHPST son del tipo destructivo, ya que una muestra de PST analizada no puede volver a analizarse debido a que se degrada en el proceso de medición. Sin embargo, se consideró aplicar un estudio Gage R&R Crossed, ya que es posible generar especímenes muy similares para ser considerados como uno solo.

Las muestras consistieron en 8 gramos de PST, que son colocadas en el instrumento de medición (A & D Infrared Moisture Determination Balance AD-4714^a), y son sometidas a un proceso de calentamiento por radiación infrarroja, por espacio de 8 minutos, para propiciar la evaporación de la humedad presente. La medición de la humedad la efectúa el instrumento por medio de una diferencia entre el peso final y el peso inicial, el PHPST, y la despliega en una pantalla incluida en el instrumento. Entre dos medidas consecutivas se permite que el instrumento se enfríe, por espacio de 5 minutos, extrayendo los platos contenedores, y manteniéndolos en reposo a temperatura constante del laboratorio de pruebas, la cual se fijó en 22°C. Para iniciar una nueva medición se procedió a tarar el instrumento.

Se seleccionaron dos muestras consecutivas en un mismo instante de tiempo, para simular dos muestras idénticas, suponiendo que en un lapso breve de tiempo el proceso de producción no sufre cambios significativos, en condiciones de operación normal del proceso. Se colectaron cinco pares de muestras a intervalos regulares de tiempo por operario. Las muestras se etiquetaron y se conservaron en envases herméticos, hasta ser sometidas al proceso de medición. La medición se efectuó un día después de la obtención de las muestras. Los cuatro operadores midieron dos veces el PHPST. Cada operador midió 5 pares de muestras de manera consecutiva, previa aleatorización, siguiendo el proceso de

medición estándar, establecido por el departamento de control de calidad de la empresa.

b. Metodología de modelo de regresión lineal múltiple

Para lograr generar un modelo de regresión lineal múltiple fue necesario hacer un muestreo durante un mes de producción, el cual consistía de 3 lotes de materia prima diferentes, esto, para visualizar de manera más clara la intervención de los predictores sobre la variable de respuesta. En esta etapa fue fundamental el conocimiento generado a través del diagrama de Ishikawa, que mostraba un panorama de las posibles variables que pudieran afectar a la variable de respuesta (%Humedad), de las cuales se seleccionaron las que se muestran en la tabla 1.

Predictores	Variables Dependientes
Agua añadida	PHPST
Velocidad de tornillo	
% Humedad y volátiles de pasta	
Aceite de pasta	
Fibra cruda	
Temperatura de horno	
Humedad de ambiente	
Temperatura horno	

Para poder realizar el modelo de regresión lineal múltiple se hizo un muestreo que abarcaba 3 lotes de materia, de aproximadamente una semana cada uno. Para hacer uso de estos datos se elaboró una bitácora donde se registraban los valores obtenidos en la producción de algunas variables de respuesta y predictores.

Para ello fue necesaria la instrucción de los trabajadores del departamento de calidad y los operadores en turno, quienes toman algunas muestras durante los turnos nocturnos de tal forma que adoptaran la costumbre de registrar algunas variables que normalmente no se tomaban en cuenta.

Los factores predictores continuos que se identificaron a través del diagrama de Ishikawa fueron: X1: cantidad de agua añadida (ml), X2: temperatura del horno (°C), X3: velocidad del disco cortador (RPM), X4: temperatura ambiente (°C), X5: porcentaje de humedad ambiental, X6: porcentaje de humedad y volátiles en pasta (%), X7: porcentaje de aceite en la pasta (%), X8: porcentaje de fibra cruda (%). La variable de respuesta fue Y: PHPST. Para la selección y adecuación del modelo se utilizó la técnica de regresión por pasos.

Para la captura de datos se realizó una bitácora en la que incluyen la mayoría de los datos presentados en la tabla 1,

para su captura posterior mediante computadora y poder lograr el estudio.

Posteriormente se realizó una revisión y limpieza de la base de datos, por medio de diagramas de caja para identificar observaciones inusuales, así como por medio residuales inusuales en el modelo de regresión. Se efectuaron las correcciones y ajustes necesarios en la base de datos, con base en los registros y bitácoras.

La identificación de los factores predictores del PHPST, que posteriormente fueron utilizados para la base de un diseño experimental, se realizó por medio de un modelo de regresión lineal múltiple. El nivel de significancia se estableció en $\alpha=0.05$. Para el análisis de datos se utilizó software Minitab® 17.1.0.

c. Metodología de EVOP

EVOP consiste en introducir los pequeños cambios en los niveles de las variables de operación, con un control establecido por los operadores o personal de experiencia. [15] Para lograr llevar a cabo los primeros cambios se tomó en cuenta al personal de la empresa para contar con apoyo de experiencia de tal modo que no se viera afectada la producción por algún cambio drástico. Antes de iniciar las modificaciones se estableció junto con el departamento de calidad de la empresa el valor óptimo para el PHSPT = 7%, con esto en mente se procedió a consultar al operador para preguntar los dos valores óptimos X1-Cantidad de agua añadida y X2-Temperatura del horno.

Después de que se establecen las intersecciones en la gráfica del EVOP, es necesario pasarlas a una tabla donde se concentren las especificaciones de las dos variables y su respectivo resultado de PHPST. En el cual se tomaron dos muestras en las mismas condiciones de producción, para después sacar un promedio de ambas y utilizar el valor resultante en los estudios posteriores.

III. RESULTADOS

a. Estudio R&R Crossed

Se encontró que el porcentaje de contribución de variabilidad del sistema de medición es de 37.80% (37.8% por parte del instrumento, y 0% por parte de los operadores). Si se incluye en el estudio los límites de especificación (4.5% – 8.5%), se observa que el porcentaje de tolerancia del sistema de medición es de 58.03%.

Con base a las normas de la AIAG (Automotive Industry Action Group), consideradas el estándar en normas de calidad, se establece 10% como porcentaje de tolerancia máximo para un sistema de medición aceptable, y de 10% a 30% como aceptable para algunas aplicaciones. De modo que el sistema de medición del PHPST se considera inaceptable (muestra una pobre capacidad).

El porcentaje de tolerancia observado para el instrumento fue de 58.03%, en tanto que para los operadores fue de 0%.

Esto sugiere que es probable que el instrumento de medición requiera una revisión seria, posible calibración o reemplazo.

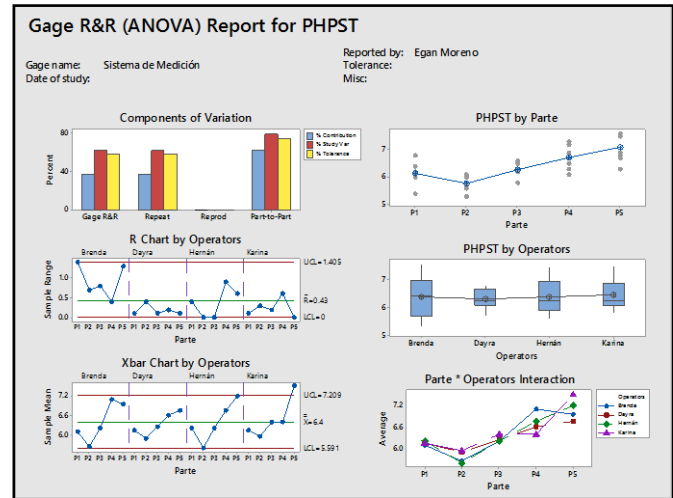


Figura. 1. Tablas de control, box plots e interacción de los resultados con respecto al personal.

Al tener los resultados mostrados anteriores se trasladó el equipo de medición (A & D Infrared Moisture Determination Balance AD-4714) a su respectiva calibración con el fin de una mejora en la confiabilidad de los resultados con respecto al análisis del sistema de medición, a lo cual se le aplicó el mismo estudio con la misma metodología para medir la mejora del instrumento de medición en la confiabilidad de los resultados.

Se encontró que el porcentaje de contribución de variabilidad del sistema de medición de 22.32% (22.33% por parte del instrumento, y 1.99% por parte de los operadores) y un porcentaje de tolerancia del sistema de medición de 53%.

El porcentaje de tolerancia observado para el instrumento fue de 50.71%, en tanto que para los operadores fue de 15.85%. Con estos resultados se refleja una mejora con respecto al análisis hecho anteriormente.

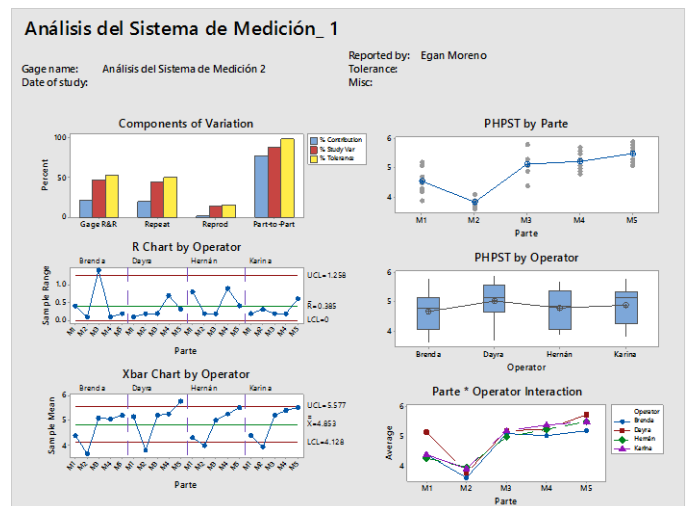


Figura. 2. Tablas de control, diagramas de caja e interacción de los resultados del personal

b. Regresión lineal múltiple

El porcentaje de humedad de la proteína de soya texturizada (PHPST) promedio fue 5.84, desviación estándar 1.08, mínimo 4.2, máximo 9.1 (Figura 6). El tamaño de muestra fue de $n = 56$ muestras de 8 gramos de proteína de soya texturizada (PST). La medición del PHPST se obtiene por medio de una diferencia entre el peso final y el peso inicial.

Los predictores que resultaron significativos fueron: X2 -temperatura del horno, X3 -Velocidad del tornillo y X4-Temperatura ambiente (Figura 7). No se encontró evidencia de violación de los supuestos sobre los residuales del modelo de regresión.

Se propuso la siguiente ecuación de regresión como modelo de pronóstico:

$$\%H = 7.86 - 0.0950 \text{ TEMP. H1} + 0.1773 \text{ VELOCIDAD} - 0.0720 \text{ TEMP. AMB} \quad (1)$$

Algunas de las cosas que se deben cumplir para que un modelo de regresión sea confiable es que el proceso esté bajo control; para ellos se procedió a realizar una tabla de control de los datos registrados durante el periodo (figura 3). Los cuales reflejan un proceso fuera de control, los cuales pueden ser ocasionados por diferencia del manejo del proceso de cada operador.

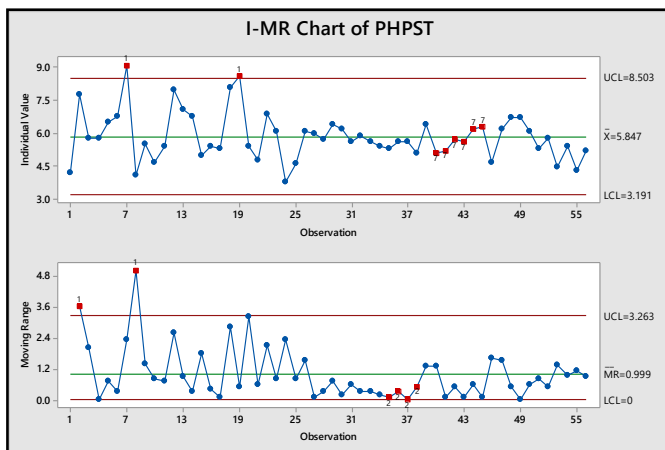


Figura. 3. Tablas de control del proceso

En la gráfica de control se pueden observar 3 fenómenos interesantes; el Test-1 refleja un distanciamiento de 3 desviaciones estándar después de la línea central, Test-7 se encontró 15 puntos dentro de una desviación estándar en la línea central y Test -2, nueve puntos dentro del mismo lado por debajo de la línea central. Lo cual refleja un problema en el trabajo de los operadores durante ese periodo, mostrando en algunas ocasiones descontrol (test-7) y en otras etapas un trabajo minucioso (test-7).

Al observar los resultados anteriores del modelo de regresión múltiple se decidió llevar a cabo un nuevo muestreo con el fin de encontrar otro modelo y poder compararlos con el fin de utilizar el mejor modelo que estuviera bajo control.

Para ello se llevó a cabo un muestreo de la producción de PST con materia prima de 3 lotes diferentes. Con lo que se obtuvieron los siguientes resultados:

El porcentaje de humedad de la proteína de soya texturizada (PHPST) promedio fue 5.84, desviación estándar 1.08, mínimo 4.2, máximo 9.1. El tamaño de muestra fue de $n = 21$ muestras de 8 gramos de proteína de soya texturizada (PST). Los predictores que resultaron significativos fueron: X2 -temperatura del horno, X7- porcentaje de aceite en la pasta y X8 - porcentaje de fibra cruda. No se encontró evidencia de violación de los supuestos sobre los residuales del modelo de regresión.

Se propuso la siguiente ecuación de regresión como modelo de pronóstico:

$$\text{Hum. PHPST} = -0.350 + 0.01235 \text{ Agua} - 0.001501 \text{ Temp H} - 0.0584 \text{ Aceite} + 0.1201 \text{ FibraPasta} \quad (2)$$

Anteriormente, en la figura 3 se describía que durante el muestreo llevado a cabo para el modelo de regresión lineal múltiple, el proceso se encontraba en descontrol, descrito por las pruebas o test mencionados. A continuación en el segundo modelo de regresión 2 (figura 4) se presentan un nueva tabla de control, donde el proceso se muestra bajo control y sin contradicciones para poderse basar en el para el estudio.

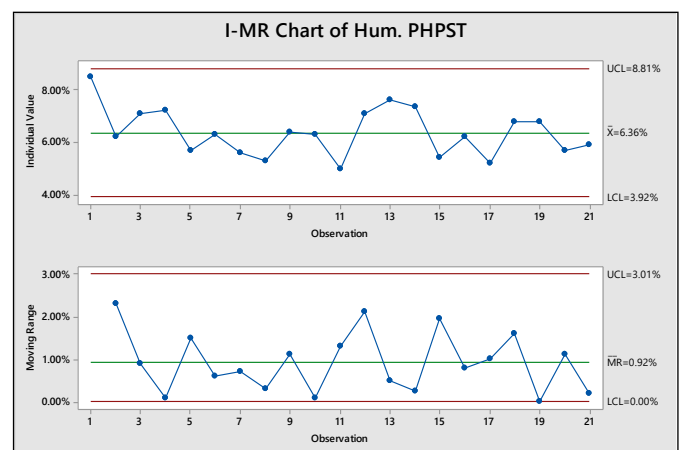


Figura. 4. Tabla de control del PHPST del segundo modelo de regresión

c. Operación evolutiva

Se logró satisfactoriamente la creación de tablas que contuvieran las formulas y ecuaciones matemáticas necesarias en el diseño de experimento, donde se colocan los valores capturados en el muestreo y permite continuar con el

siguiente ciclo o fase, esto se puede observar claramente en la figura 45 y 46 . Para los cuales era necesario un muestreo, el cual se realizó de manera minuciosa y con ayuda de la persona más experimentada en el proceso, obteniendo los siguientes resultados para el primer ciclo (Tabla 2).

TABLA 2
Resultados de PHPST primer Ciclo

#	X1	X2	PHPST
1	94	15	4.7
2	92	14.5	6
3	96	15.5	4.25
4	96	14.5	5.5
5	92	15.5	7.2

El símbolo # representa el número de toma de muestra, X2 la temperatura, X2 agua añadida y PHPST el valor de la humedad

Los primeros resultados fueron realizados con datos reales mostrados en la tabla 4, y los datos del segundo ciclo (figura 46, anexo E) fueron simulados, los cuales indicaban un movimiento a un área más cerca del óptimo, el cuál marca como centro el punto 5 del primer ciclo.

IV. DISCUSIÓN

Esta investigación tuvo como propósito identificar los factores predictores de PHPST e intervenir mediante estudios para conocer su comportamiento, de tal forma que los conocimientos adquiridos ayudaran a lograr control del proceso, con ayuda del análisis de sistema de medición, modelos de regresión lineal múltiple y un diseño de experimentos.

Los factores predictores más influyentes en el PHPST fueron: Agua añadida, Temperatura del horno y porcentaje de aceite en pasta, los cuales se identificaron con una regresión lineal múltiple y como complemento para ayudar al control de la producción en conjunto del diseño de experimentos EVOP.

De los resultados obtenidos en la presente investigación se encuentra el análisis del sistema de medición (MSA), el cual recibe mucha atención en esta investigación debido a que sustenta que la investigación se está realizando con los datos más confiables posibles.

En la sección de resultados se describen las normas en las que se basan los estudios R&R, el cual se ha mejorado en los últimos 2 años.

En un estudio previo realizado en la empresa se encontró que el sistema de medición era deficiente, donde se encontró un 81.69% de contribución a la variabilidad por parte del sistema de medición y un porcentaje de tolerancia del 92.42%, lo cual se mejoró por medio de un mantenimiento.

En el año 2016 se realizó el primer análisis del sistema de medición de la presente investigación, con un resultado de 37.8% de contribución a la variabilidad, y un porcentaje de tolerancia de 58.03%. Lo cual llevó a una calibración del instrumento con el fin de mejorar los resultados y a lo cual se obtuvo un 22.32% de contribución a la variabilidad y 53% de tolerancia del sistema de medición. Con lo cual se puede concluir como una mejora al sistema de medición de la PST del departamento de calidad, sin embargo, es necesario una calibración especial o cambio de instrumento de medición para la obtención de resultados aún más confiables.

La identificación de los predictores más influyentes concluyó satisfactoriamente al duplicar el modelo de regresión lineal múltiple, decisión se tomó en base al proceso más controlado, esto, identificando por las tablas de control mostradas en los resultados. Durante la investigación se establecieron 8 diferentes factores, sin embargo, es posible que en investigaciones futuras puedan ser incluidos más factores.

Además, el estudio deja herramientas para que los encargados del departamento de calidad puedan saber qué modificaciones hacer en los predictores establecidos como influyentes significativos.

Por último se realizó el diseño de experimentos llamado "Operación evolutiva", el cual se llevó a cabo en la producción de PST estándar, en el cual se empiezan a ver las diferencias de los resultados de las intersecciones para el movimiento a una fase más óptima.

Durante la investigación hubo limitaciones de tiempo por la prolongación de los cambios sugeridos para el correcto desenlace de los estudios realizados, uno de ellos fue el diseño de experimentos, el cual requería de una regulación más confiable en las cantidades añadidas de agua y niveles de temperatura necesarios.

El estudio de la PST es un tema que siempre deberá ser estudiado debido a los cambios que se generan en el año, a ello, se le añade que sólo es estudiada la soya estándar y en la fábrica se producen al menos 6 productos, los cuales podrían ser estudiados en investigaciones futuras.

V. CONCLUSIÓN

Como conclusión del presente trabajo de investigación realizado con la ayuda del departamento de calidad de la compañía Alimentos Colpac S.A de C.V, se llega a la conclusión de una necesidad de establecer el control dentro del proceso para lograr mejores resultados. Gran parte de los problemas con el control se deben a la falta de dispositivos que regulen de manera adecuada los factores que se utilizan para el control de la PST, entre ellos, agua y temperatura del horno, los cuales carecen de exactitud.

Las tablas de control que indican que el proceso está fuera de control, el cual a través del estudio de los predictores pudo establecerse mejoras en los resultados, intercambio de

información con el recurso humano y sugerencias para la optimización de dicho proceso.

Por medio de las herramientas e información brindada, el personal de la empresa puede saber las posibles modificaciones que se pudieran hacer en los predictores del proceso para alcanzar el valor óptimo requerido. Otro aspecto importante es la metodología de los operadores, los cuales demostraron ser en parte responsables del descontrol en el proceso, debido a las diferencias en el manejo de los principales predictores.

El estudio brinda conocimiento de una región aceptable para mantener el proceso bajo control, sin embargo, la parte principal la hace la empresa al cuidar los factores más significativos mencionados, para un mejor control.

VI. REFERENCIAS

- [1] J. Ringen, “carnivores may never know the difference,” *Fast Company*, no. 189, pp. 106–159, <https://www.fastcompany.com/>, 2014.
- [2] M.B. Cope, J.W. Erdman Jr, D.B. Allison, “The potential role of soyfoods in weight and adiposity reduction: an evidence-based review,” (ENG), *Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity*, vol. 9, no. 3, pp. 219–235, 2008.
- [3] A.S. Cassini, L. Marczak, C. Noreña, “Drying Characteristics of Textured Soy Protein: A Comparison between Three Different Products,” *Drying Technology*, vol. 25, no. 12, pp. 2047–2054, 2007.
- [4] N. Torres and A. R. Tovar-Palacio, “La historia del uso de la soya en México, su valor nutricional y su efecto en la salud,” *Salud pública Méx*, vol. 51, no. 3, pp. 246–254, 2009.
- [5] A. Hosseini, Kh. Farhangdoost, M. Manoochehri, “Modelling of extrusion process and application of Taguchi method and ANOVA analysis for optimization the parameters,” *mech*, vol. 18, no. 3, 2012.
- [6] D.I. Gbenyi, I.Nkama, M.H. Badau, T.A. Shittu, “Modelling of system parameters of extruded sorghum–cowpea breakfast cereal using response surface methodology,” *Nigerian Food Journal*, vol. 33, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [7] E. M. J. Smith, “How does Standard Gage R&R Measure Up?,” *Quality Magazine*, .40-43, Jun. 2014.
- [8] C. M. Douglas, “Análisis de Capacidad del Proceso y de Sistemas de Medición: control Estadístico de la Calidad,” *Arizona: Willey*, vol. 3ra ed, pp. 377–380, 2007.
- [9] R.E Walpole, R. Myers, S.L. Myers, K.ye, Ed., *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 8th ed.: Pearson prestice hall, 2007.
- [10] M. Douglas C., Ed., *Diseño y análisis de experimentos: El diseño general 2^k*, 2nd ed.: Editorial Limusa S.A de C.V, 2007.