

USO SECUENCIAL DE HERRAMIENTAS DE CONTROL DE CALIDAD EN PROCESOS PRODUCTIVOS: UNA APLICACIÓN EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO

María Isabel López-Rodríguez¹
maria.i.lopez@uv.es

Patricia López-Linares
patrilop88@gmail.com

Universitat de València

fecha de recepción: 15/10/2014
fecha de aceptación: 17/12/2014

Resumen

Las diferentes herramientas del Control Estadístico de Calidad proporcionan mejores resultados si su uso se lleva a cabo de manera secuencial, facilitando la detección de los puntos débiles del proceso productivo. Así, en el presente estudio se expone un método de trabajo en el que se utilizan, atendiendo a la necesidad en cada punto de la cadena de producción, algunas de dichas herramientas. Concretamente se propone el uso del diagrama de flujo, gráfico de Pareto, hojas de comprobación, gráficos de control (en este caso gráfico p y gráfico de media-recorrido), así como el análisis de la varianza (ANOVA). El procedimiento se aplica a una empresa del sector agroalimentario, interesada en dar una solución al problema derivado del elevado número de quejas por parte de sus clientes. Las primeras conclusiones, en las que se observa un porcentaje elevado de elementos defectuosos (superior al 30%), llevan a analizar las causas principales, la constatación de la capacidad del proceso y la cuantificación de la pérdida derivada de esta situación, mediante la función de pérdida de Taguchi. Para ello se realiza un estudio previo del descentramiento del proceso y del exceso de variabilidad que explicarían la falta de capacidad del mismo para fabricar según especificaciones.

¹ María Isabel López-Rodríguez, Departamento de Economía Aplicada, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universitat de València, Avda. Tarongers s/n, 46022 Valencia (España).

Palabras clave: Gráfico de Pareto; Gráficos de control; ANOVA; Índices de capacidad; Función de pérdida de Taguchi; Control de calidad; Mejora continua de procesos.

Abstract

When making use of the different existing tools for Statistical Process Control (SPC), better results can be achieved if a sequential approach is used. This working methodology will provide easier ways to detect any weak point in the production process. Here one such methodology is presented, during the application of which the most appropriate statistical tools are used in each step of the production chain, depending on the needs arising for each of them. In the process shown in this paper, the proposed tools are the flowchart, Pareto chart, check sheet, two different types of control charts (in this case p-chart and \bar{x} -R chart), and finally the analysis of variance (ANOVA). This procedure is applied to a production process in a food plant, in which the main goal at the moment the problem arose was being able to provide a solution to a specific problem that led to a large number of complaints from their customers. The first results showed a high percentage (over 30 %) of nonconforming units. As a consequence, an analysis of the major causes was carried out, followed by the verification of the process capability and the quantification of the economic loss derived from this situation, by means of the Taguchi loss function. To achieve the latter, process centering and spread were studied. The observed excess in variability would explain the lack of capability to manufacture according to specifications.

Keywords: Pareto chart; Control chart; ANOVA; Capability index; Taguchi loss function; Quality Control; Continuous process improvement.

1. Introducción

El control de la calidad es un factor necesario a tener en cuenta en las empresas, ya que influye en la satisfacción del cliente y por lo tanto en la economía de las mismas. La calidad está estrechamente relacionada con la productividad ya que los defectos de fabricación ocasionan baja calidad en el producto lo que afecta a la productividad global de la empresa y a su rentabilidad final (Orlandoni, 2012). Por lo tanto el control de la calidad puede ocasionar un aumento de la productividad y de los beneficios para la empresa.

Esta filosofía de trabajo se puede conseguir mediante la mejora continua de los procesos, en la que se aplican distintas herramientas estadísticas que permitan mejorar y controlar continuamente la producción. Así interviene el llamado Control Estadístico de Procesos (SPC, Statistical Process Control), que no es sólo una colección de herramientas y técnicas, sino una forma de pensar que es esencial para que la mejora de la calidad nunca termine (Calcutt, 1995). El uso habitual y correcto de herramientas de control de calidad, en concreto de las siete herramientas de la calidad, permitirá que se resuelvan el 95 % de los problemas en los puestos de trabajo (Ishikawa, 1989). El SPC se ha aplicado a sectores tanto de la rama de producción como de servicios demostrando la eficacia de estas herramientas.

Para la comprensión del funcionamiento de un proceso es importante realizar diagramas de flujo en el que se observen todas las etapas de las que consta el mismo, como realizan Tolamatl, Gallardo, Varela y Flores (2011) y así identificar claramente en qué parte se sitúan los problemas principales. Una vez detectado el problema y las causas que lo originan se procede a priorizarlas utilizando el gráfico de Pareto; herramienta que permite observar de manera visual y rápida las causas principales del problema. Al igual que el presente estudio, Tolamatl *et al.* (2011) utilizan el diagrama de Pareto para determinar cuáles son los principales defectos que se producen en un producto.

Otra de las herramientas más utilizada por su gran utilidad son los gráficos de control que es una herramienta que ayuda a comprobar si el proceso se encuentra bajo control estadístico, pudiendo así prevenir problemas o detectarlos una vez producidos y poder corregirlos. Por un lado, los gráfico media-recorrido (\bar{x} -R) se han usado tanto como herramienta para validar un método analítico (Riu, 2005) como para el control de una característica de calidad (Huerga, Blanco y Abad, 2005). Muchas veces, asociados a los gráficos \bar{x} -R existen estudios de capacidad (Caicedo, 2011; López-Rodríguez y Guerola Adell, 2013), ya que una vez comprobado que el proceso está bajo control, se puede determinar si es capaz de producir conforme a las especificaciones. Por otro lado, los gráficos p, han permitido controlar la proporción de elementos defectuosos a lo largo del tiempo (Caicedo, 2011; Huerga, Abad y Blanco 2012; y Tolamatl *et al.*, 2011).

Otra de las herramientas muy utilizadas en el control de calidad es el análisis de la varianza (ANOVA) con la que se puede determinar la existencia de factores que marquen diferencias significativas en el producto final (Botero, Arbeláez y Mendoza, 2007).

En la empresa objeto de este estudio actualmente el proceso de fabricación de productos se lleva a cabo sin comprobar si el producto final se ajusta a las características deseadas por la empresa, en cuanto a atributos de calidad, y también se desconoce si existe variabilidad en el proceso. Por lo que puede haber una gran cantidad de tipos defectos en el producto final que ocasionan reclamaciones por parte del cliente y gastos de tiempo innecesario al tener que reprocesar el producto defectuoso, lo que lleva a un aumento de los costes asociados a la no calidad.

Para resolver el problema se ha planteado un objetivo principal: control y mejora continua del proceso de producción de cola de gamba rebozada (línea de la empresa en la que se han detectaron más problemas) utilizando las herramientas estadísticas anteriormente citadas. Para ello se abordarán los siguientes objetivos:

1. Determinación de los tipos de defectos más habituales que se producen en el producto final.
2. Estimación de la proporción de elementos defectuosos.
3. Control de la variable "peso de rebozado/gamba".
4. Comprobación de si existen factores que influyan en el producto final.

En primer lugar se va a determinar cuáles son los tipos de defectos que se producen habitualmente en la cola de gamba rebozada para así poder actuar solucionando prioritariamente las causas de dichos defectos.

Debido a que se desconoce la proporción de elementos defectuosos se procederá a estimarla para tener una idea de la magnitud del problema y poder comprobar si, en un futuro, la actuación sobre las causas prioritarias ha sido eficaz (comparando si se ha logrado una disminución en el porcentaje de defectos).

Habiéndose constatado que algunos tipos de defectos están relacionados con el incorrecto peso de rebozado en el producto alimentario estudiado, se procede a realizar un estudio de control de variables para la característica de calidad “peso de rebozado/gamba”.

Por último, debido a la elevada variabilidad detectada en el proceso, se va a comprobar si existe algún factor, dentro del proceso de producción, que la provoque.

2. Metodología

Tal como se indica en el epígrafe anterior, en este estudio se aplica el control estadístico de procesos (SPC) para el control y mejora del proceso. El SPC combina la utilización de herramientas básicas, las llamadas siete herramientas de Ishikawa, con otras más avanzadas, como el análisis de la varianza (ANOVA).

En este estudio se utilizarán concretamente: el diagrama de flujo, la hoja de control, el diagrama de Pareto, los gráficos de control (p y $\bar{x} - R$) y el ANOVA.

2.1. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo es una representación gráfica que refleja la secuencia cronológica de los pasos que conforman el proceso y resulta muy útil para desarrollar la definición y la comprensión del mismo (Besterfield, 2011). Gracias a su elaboración es fácil observar de manera visual y rápida todas las etapas de fabricación de un producto. Es posible, por consiguiente, mediante su utilización detectar en qué punto(s) del proceso puede(n) existir problemas potenciales.

2.2. Hoja de control o comprobación

En las primeras etapas de implementación del SPC será necesario recoger datos acerca del proceso de investigación, ya sean históricos o actuales. La hoja de recogida de datos, denominada hoja de control o comprobación, es un formato previamente impreso que permite recoger los datos de forma sencilla, concisa y estructurada (Carot, 1998) para que posteriormente puedan ser analizados. La hoja se diseña en función de las necesidades, especificando claramente el tipo de datos que van a analizarse. También debe establecerse el periodo de recogida de datos (Galgano, 1995).

Cuando se recogen los datos en diversas hojas, es recomendable realizar una hoja de síntesis para facilitar la comprensión del problema y tener un resumen de los datos.

2.3. Diagrama de Pareto

Vilfredo Pareto, economista italiano (1848–1923) enunció el principio de la distribución de la riqueza en Europa. Encontró que ésta distaba mucho de la equidistribución. Concretamente el 20% de la población poseía el 80% de la riqueza (Valderrey, 2012). Posteriormente Joseph Juran reconoció este concepto como algo universal que podría aplicarse en muchos campos y enunció la regla del 80/20 en honor a Pareto, conocida como principio de Pareto.

El diagrama de Pareto es una herramienta estadística que permite detectar las causas principales del problema objeto de análisis y facilita las prioridades de intervención, ayudando así en la toma de decisiones.

2.4. Gráficos de control

Los procesos de producción normalmente se encuentran bajo control estadístico produciendo productos aceptables durante periodos largos de tiempo pero pueden aparecer causas asignables (de carácter no aleatorio) que provocarán la aparición de variabilidad y por tanto el no cumplimiento de especificaciones. Los gráficos de control son herramientas efectivas para reducir la variabilidad y mejorar así el proceso ya que permiten observar si el proceso se encuentra bajo condiciones estables.

La mayoría de los gráficos de control están formados por tres líneas paralelas y horizontales: una línea central (LC) que corresponde con el valor promedio del parámetro de la característica de calidad que se desea controlar, y otras dos denominadas límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI) que marcan el intervalo dentro del cual se espera que estén el 99,73% de las observaciones para un proceso bajo control estadístico. Si todos los puntos se sitúan entre el LCI y el LCS, y no se observa ningún comportamiento anómalo (rachas, ciclos, inestabilidad...) el proceso está operando bajo control y sin anomalías. Sin embargo, cuando un punto se sitúa por encima del LCS o por debajo del LCI, el proceso estará fuera de control y será necesario investigar las causas asignables que provocan ese comportamiento.

Los gráficos de control de procesos se pueden clasificar en tres grupos: gráficos de control por variables, gráficos de control por atributos y gráficos del control por número de defectos. El tipo de gráfico depende de la naturaleza de la característica de calidad a controlar. Si la característica de calidad es medible se suele utilizar el control por variables. Cuando no es medible y el producto se clasifica como conforme o no conforme se utilizan, habitualmente, los gráficos del control por atributos. Y por último, como su nombre indica, los gráficos del control por número de defectos se utilizan cuando lo que se persigue es analizar el número de defectos que se producen.

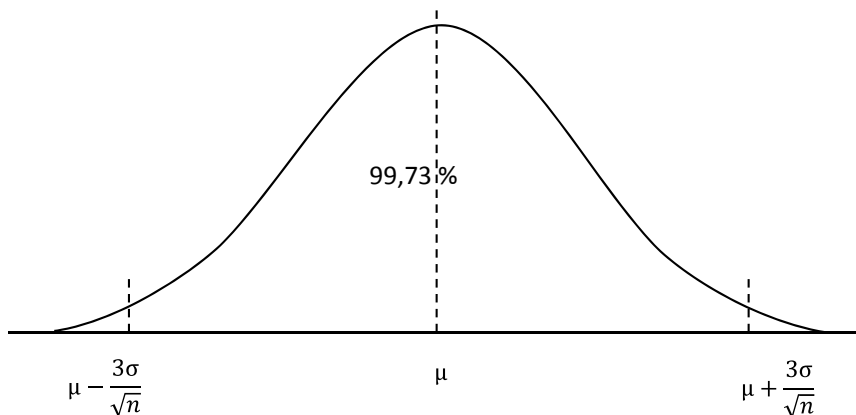
Si se considera una característica de calidad medible (X) que sigue una distribución Normal con media μ y desviación estándar σ , entonces la media muestral (\bar{X}) seguirá también una distribución normal con media μ y desviación $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. Una de las propiedades de la distribución Normal es que la proporción de mediciones situada entre la media y la

media $\pm K$ veces la desviación estándar es una constante. Si $K=3$ dicha proporción es del 99,73%, tal y como se muestra en la figura 1. Aunque normalmente la distancia de los límites de control a la línea central es 3 veces la desviación típica, K se puede sustituir por otro valor, estableciendo zonas de aviso (Riu, 2005).

A partir de la propiedad expuesta se obtiene que los límites del gráfico de control para \bar{X} son:

$$\begin{aligned} \text{LCS} &= \mu + \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} \\ \text{LC} &= \mu \\ \text{LCI} &= \mu - \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} \end{aligned}$$

Figura 1. Campana de Gauss correspondiente a la media muestral



La media (μ) y la desviación estándar (σ) pueden ser conocidas o no. En el caso de que no se conozcan se deben estimar para obtener el gráfico.

2.4.1. Control por variables

Cuando se realiza un control por variables, es necesario controlar tanto el valor medio de la característica de calidad a medir como su variabilidad (Shewhart, 1980). El control del promedio se realiza con el gráfico \bar{x} y la variabilidad puede controlarse con un gráfico de control de la desviación, gráfico S o con un gráfico de control del recorrido, gráfico R . El gráfico media-recorrido ($\bar{x}-R$) se suele utilizar cuando las muestras obtenidas tienen un tamaño inferior o igual a 10, por el contrario el gráfico media-desviación ($\bar{x}-S$) se utiliza cuando las muestras son de tamaño superior a 10. Dado que, en el caso del trabajo que se presenta, las muestras obtenidas son de tamaño 5, se utilizará el gráfico $\bar{x}-R$. Por lo tanto se va a exponer cómo se obtienen las líneas de control del gráfico $\bar{x}-R$, así como la estimación de los parámetros poblacionales.

Suponiendo que la característica de calidad medible se ajusta a una distribución Normal con media (μ) y desviación estándar (σ) desconocidas, se sabe que el 99,73% de las medias muestrales se encuentran entre $\mu - 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ y $\mu + 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. En el caso de que los parámetros poblacionales μ y σ sean desconocidos es necesario estimarlos.

Para estimar la media (μ) y variabilidad (σ) se utilizarán estimadores insesgados de ambos parámetros ($\bar{\bar{x}}$ y $\frac{\bar{R}}{d_2}$ respectivamente), de manera que si se dispone de k muestras y que \bar{x}_i y R_i son la media y recorrido, respectivamente, de la i -ésima muestra ($i \in \{1, 2, \dots, k\}$), entonces, para estimar μ se considerará $\bar{\bar{x}}$, esto es

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_k}{k}$$

Y para estimar σ se utilizará el estimador $\frac{\bar{R}}{d_2}$, donde d_2 es una constante dependiente del tamaño muestral y

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_k}{k}$$

Estimados los parámetros del proceso (μ y σ), se obtiene las expresiones correspondientes a los límites del gráfico \bar{x} - R (Montgomery, 2010: 209-211):

- Gráfico de media:
$$\begin{aligned} LCS &= \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \\ LC &= \bar{\bar{x}} \\ LCI &= \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \end{aligned}$$
- Gráfico de recorrido:
$$\begin{aligned} LCS &= D_4 \bar{R} \\ LC &= \bar{R} \\ LCI &= D_3 \bar{R} \end{aligned}$$

Donde A_2 , D_3 y D_4 son constantes dependientes del tamaño muestral.

Los valores de dichas constantes, junto con los de d_2 mencionada anteriormente, se encuentran recogidas en el Anexo (en él también se pueden consultar los de las constantes A_3 , B_3 , B_4 y c_4 necesarias para la construcción del gráfico media-desviación así como para la estimación de σ en el caso de que éste fuese el gráfico utilizado).

2.4.1.1. Análisis de capacidad del proceso

La capacidad del proceso sirve para constatar si un proceso (bajo control) es capaz de producir piezas que verifiquen especificaciones. Para su correcta definición es aconsejable precisar previamente lo que se entiende por los límites de tolerancia del proceso.

Siendo X una característica de calidad medible con μ = valor objetivo, de diseño o nominal; LTI = límite de tolerancia inferior; LTS = límite de tolerancia superior y $[LTI, LTS]$ = intervalo de tolerancia, entonces se cumplirán especificaciones si $LTI \leq X \leq LTS$.

Se suele utilizar para analizar la capacidad unos índices que reciben el nombre de índices de capacidad, concretamente el índice de capacidad potencial (en procesos centrados) y el índice de capacidad real (en procesos descentrados) que tienen las siguientes expresiones:

$$\text{Índice de Capacidad potencial: } C_p = \frac{LTS-LTI}{6\sigma}$$

$$\text{Índice de Capacidad real: } C_{pk} = \min\left(\frac{LTS-\mu}{3\sigma}, \frac{\mu-LTI}{3\sigma}\right)$$

Desde el punto de vista de calidad se exige que C_p sea igual o superior a 1,33.

2.4.1.2. Análisis de los costes derivados de la no calidad

Una vez obtenidos los resultados del estudio de capacidad se puede realizar un estudio de los costes de la pérdida de calidad. Para ello se utiliza la función de pérdida Taguchi (Taguchi, 1987). La función de pérdida cuantificará el coste derivado de la no calidad, atendiendo a lo lejos que se esté del objetivo (López, 2003). La función de pérdida propuesta por Taguchi es:

$$L(X) = K(X - b)^2$$

Siendo K el denominado coeficiente de pérdida y b el valor objetivo de la característica analizada.

Se puede demostrar que la pérdida media unitaria se obtiene atendiendo a la expresión:

$$K(\sigma^2 + (\mu - b)^2) \quad (1)$$

Una vez detectado el incumplimiento del objetivo y para determinar en qué sentido deben enfocarse prioritariamente las medidas que permitan la resolución del mismo, si a disminuir la variabilidad o el descentramiento del proceso, se tiene en cuenta que la pérdida media unitaria se puede descomponer, según (1), en dos factores: uno dependiente de la variabilidad (σ^2) y otro del descentramiento ($\mu - b$).

2.4.2. Control por atributos

En algunos casos resulta menos costoso realizar un control por atributos, esto es, clasificar las unidades producidas en conforme o disconforme respecto de las especificaciones establecidas, y así estimar qué porcentaje de ellas son defectuosas. Para este caso existen dos gráficos de control por atributos: el gráfico p y el gráfico np . Utilizando cualquiera de ellos se puede controlar que la proporción de elementos defectuosos se mantiene bajo control y en ese caso estimar dicha proporción. En el caso del presente estudio se va a utilizar el gráfico p con objeto de analizar la evolución del producto en términos de porcentaje a lo largo del tiempo. Las expresiones de los límites del mismo son (Montgomery, 2010, pp. 286-287):

$$LCS = \hat{p} + 3 \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}}$$

$$LC = \hat{p}$$

$$LCI = \hat{p} - 3 \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}}$$

Siendo:

$$\hat{p} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_k}{n_1 + n_2 + \dots + n_k}$$

Donde d_i es el número de unidades defectuosas de la i -ésima muestra ($i \in \{1, 2, \dots, k\}$) y n_i es el tamaño de la i -ésima muestra ($i \in \{1, 2, \dots, k\}$). Si todas ellas tuvieran el mismo tamaño (n), entonces:

$$\hat{p} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_k}{n \cdot k}$$

2.5. ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística usada para contrastar la hipótesis de igualdad de medias de tres o más poblaciones Normales y homocedásticas. Se utiliza para analizar la posible influencia de uno o más factores sobre la variable(s) respuesta en un proceso. En el caso del ANOVA de un factor, a t niveles, suponiendo que, para cada nivel, la variable respuesta sigue una distribución Normal con media μ_i y varianza σ^2 , para $i \in \{1, 2, \dots, t\}$, el contraste de hipótesis que se plantea es:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_t$$

H_1 : al menos dos de las t medias no son iguales

En la práctica, y teniendo en cuenta el enfoque del p -valor (p) si para un nivel de significación α (normalmente el 5%), se verificase que $\alpha > p$ se rechazaría H_0 (esto es, las medias presentan diferencias significativas, y por lo tanto el factor considerado influye en la variable respuesta), y en caso contrario ($\alpha < p$), entonces no se rechaza H_0 (los valores medios no son significativamente distintos, o equivalentemente, el factor no influye en la variable respuesta).

3. Recogida de datos

Los datos utilizados en el presente trabajo se han obtenido apoyándose en el uso de hojas de control o comprobación para su recogida. Las mismas han permitido obtener los datos correspondientes a la cantidad de tipos de defectos que aparecen en el producto final. Estos datos se han analizado mediante el diagrama Pareto con la finalidad de observar los tipos de defectos más habituales. También se utilizan para construir el gráfico p y estimar así la proporción de elementos defectuosos. Concretamente se han tomado 24 muestras de tamaño 110 mediante muestreos al final de línea durante todos los días de producción de los meses de Mayo y Junio del año en curso.

Por otra parte, para realizar el estudio de la característica de calidad “peso de rebozado/gamba” se han tomado 34 muestras de tamaño 5 en las que se detallan los gramos del peso de rebozado y se elabora con los mismos un gráfico de control \bar{x} -R.

Tras la realización del estudio de capacidad y la cuantificación del coste derivado de la no calidad se pasará a comprobar si el factor puesto de elaboración influye en la calidad del producto final. Para ello se han tomado los datos correspondientes al peso de masa de rebozado analizada a la salida de cada puesto.

4. Resultados

Los resultados se han clasificado según los cuatro subobjetivos marcados en el trabajo.

4.1. Determinación de los tipos de defectos más habituales del proceso

El primer paso realizado es la elaboración de un diagrama de flujo del proceso de elaboración de cola de gamba rebozada, en el que se observan todas las etapas del proceso que transcurre desde la recepción de las materias primas necesarias para su elaboración, hasta su distribución final (Figura 3).

También se ha realizado otro diagrama (Figura 2) en el que se puede observar visualmente la distribución de las etapas. En éste se reflejan los 5 puestos individuales de elaboración de cola de gamba rebozada en los que se realizan las etapas de rebozado y fritura. En cada puesto existe un operario distinto.

Figura 2. Distribución de las etapas del proceso

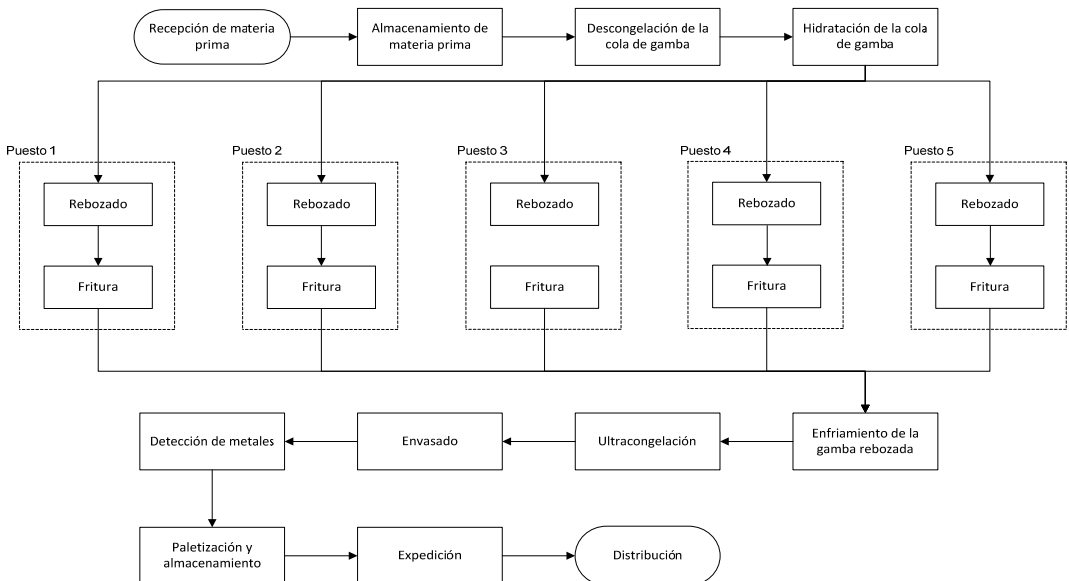
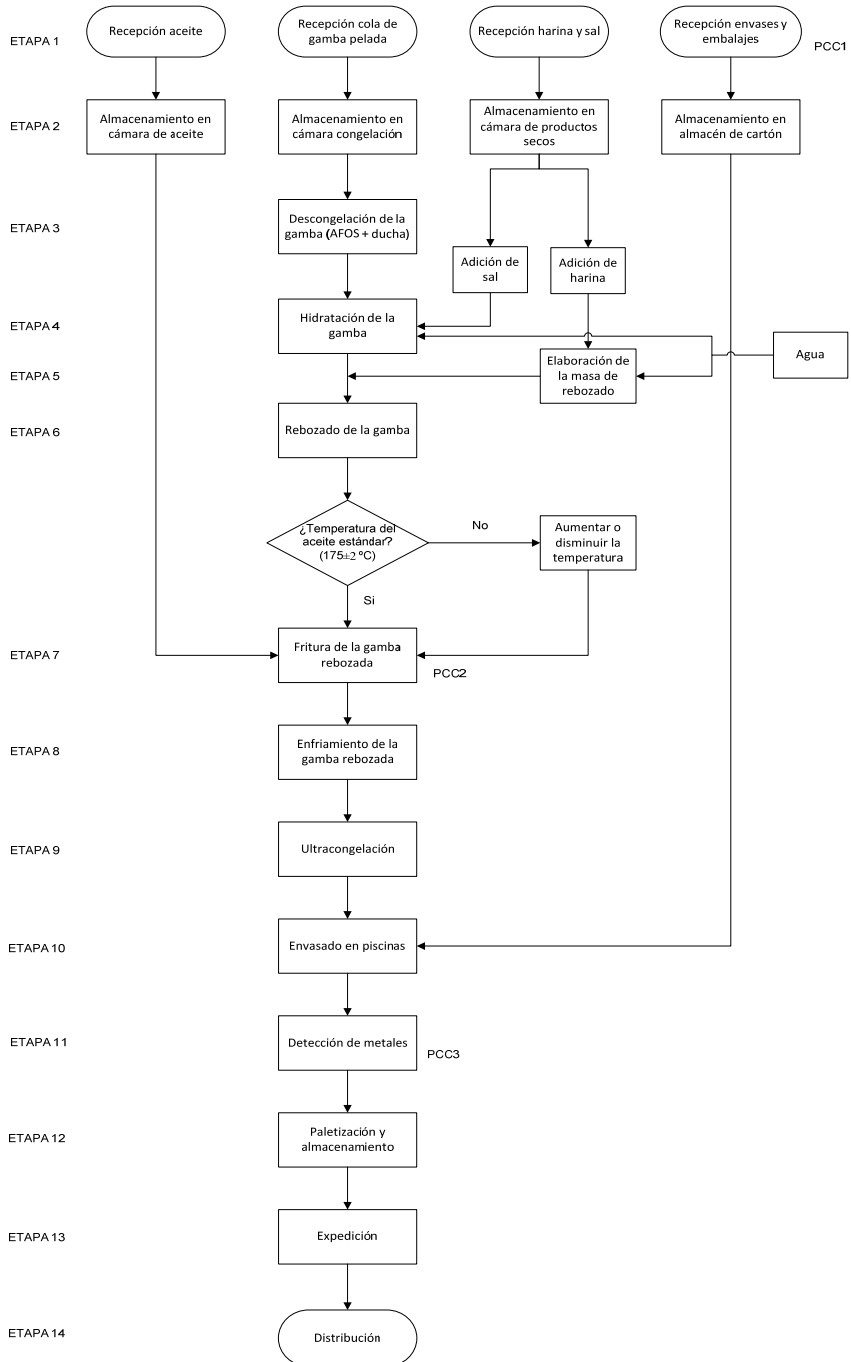


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de cola de gamba rebozada



Una vez identificadas las distintas actividades que componen el proceso se procede a la recogida y análisis de los datos necesarios para el trabajo propuesto.

Se van a realizar muestreos cada día de fabricación que permitan contabilizar los tipos de defectos del producto final mediante una hoja de recogida de datos (Tabla 1) en la que se indica: el nombre del producto, la fecha, el lote, el código, la línea de fabricación y los kilogramos producidos. Los tipos de defectos que se muestran en dichas hojas han sido previamente identificados por el equipo de calidad y los operarios de la línea. También han identificado las causas asociadas a cada uno y sus posibles soluciones.

Todos los datos recogidos con la hoja de control durante los días de recogida de muestras se registran en otra hoja resumen u hoja de síntesis en la que se observan de forma ordenada todos los datos obtenidos.

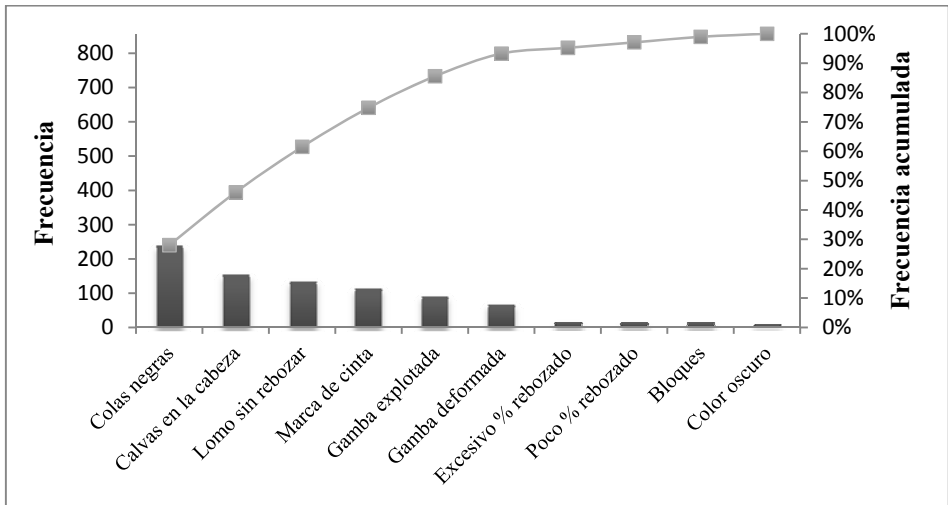
Tabla 1. Hoja de control o comprobación

PRODUCTO: Cola de gamba rebozada		Fecha: 30/05/2014
Código: 35005		Lote: 14150
Línea: 4		Kg producidos: 3500
DEFECTOS	Nº	REPETICIONES
Calvas en la cabeza	7	IIII II
Gamba explotada	2	II
Marca de cinta	8	IIII III
Lomo sin rebozar	2	II
Colas negras	15	IIII IIIII
Excesivo % de rebozado	2	II
Poco % de rebozado	0	
Bloques	1	I
Gamba deformada	1	I
Color oscuro	0	
Total defectuosos:	38	35% TOTAL DEFECTUOSOS

Con los datos obtenidos en la hoja de síntesis se procede a realizar un diagrama de Pareto (Figura 4), teniendo en cuenta el total de tipos de defectos observados, para determinar sobre qué tipos de defectos hay que actuar prioritariamente.

Para ello, se han ordenado de mayor a menor los defectos atendiendo a su frecuencia de aparición, situando en el eje de abscisas los defectos ordenados y en los ejes de ordenadas la frecuencia absoluta ordinaria y la acumulada en tanto por cien.

Figura 4. Gráfico de Pareto para los tipos de defectos del producto



De su observación se deduce que la regla 80/20 no se cumple ya que en este caso para resolver el 75% de los defectos producidos en la cola de gamba rebozada sería necesario resolver el 40% de las causas. Sin embargo, gracias a la realización de esta herramienta, se sabe que hay que comenzar resolviendo las causas detectadas por la empresa que están asociadas a los defectos de colas negras, calvas en la cabeza, lomo sin rebozar y marca de cinta.

4.2. Estimación de la proporción de elementos defectuosos del proceso

Entendiendo por elemento defectuoso la cola de gamba rebozada que presenta alguno o algunos de los defectos anteriormente citados (colas negras, calvas en la cabeza, marca de cinta...) y partiendo de los datos referentes al número total de elementos defectuosos por día detallados en la hoja de síntesis, se procederá a estimar la proporción de elementos defectuosos a nivel global mediante el uso de un gráfico de control p. Además el gráfico obtenido será de ayuda a la empresa en un futuro para comprobar si la proporción de elementos defectuosos varía dentro de los límites permisibles, es decir, si el proceso se mantiene bajo control.

A partir de los datos se obtiene que:

$$\hat{p} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_k}{n_1 + n_2 + \dots + n_k} = \frac{857}{2640} = 0,32$$

Siendo d_i el número de unidades defectuosas de la i -ésima muestra ($i \in \{1, 2, \dots, k\}$ y $k = 24$) y n_i el tamaño de la i -ésima muestra ($i \in \{1, 2, \dots, k\}$ y $k = 24$).

Tras la obtención de los límites de control del gráfico p y construcción del mismo se observa que hay una muestra que sale fuera de los límites de control, por lo que tras eliminarla y recalculando los límites se obtiene el gráfico p (Figura 5), en el que puede observarse que todos los datos muestrales (proporciones en este caso) se encuentran entre el LCI y el LCS, es decir, el proceso está bajo control.

Figura 5. Gráfico p del proceso



Además, a partir del mismo y atendiendo a la LC se obtiene que la estimación del porcentaje de elementos defectuosos es del **32%**.

4.3. Control de la característica de calidad “peso de rebozado/gamba”

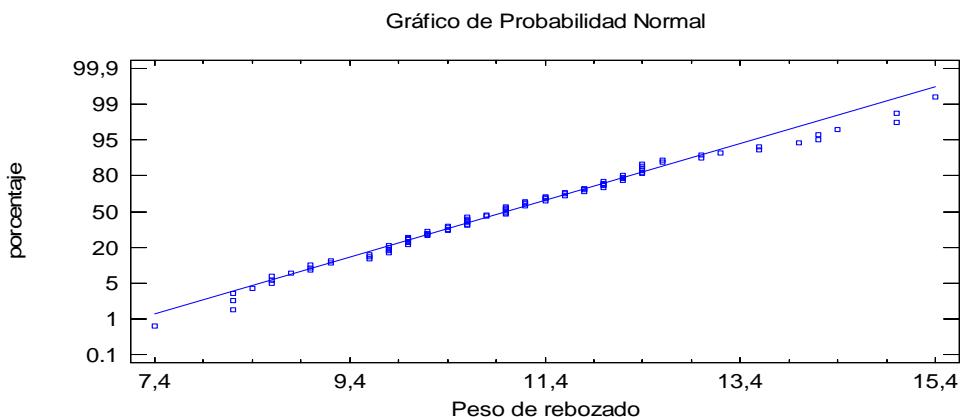
Habiéndose constatado que algunos tipos de defectos están relacionados con el incorrecto peso de rebozado en el producto alimentario estudiado, se procede a realizar un estudio de control de variables para la característica de calidad “peso de rebozado/gamba”. Un paso previo es la constatación de que la característica de calidad estudiada se ajusta a una Normal. Para ello se ha realizado un contraste de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, con la corrección de Lilliefors, al no especificarse en la hipótesis de normalidad la media y desviación típica de la distribución. El resultado se recoge en la tabla que sigue:

Tabla 2. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para X=peso rebozado/gamba

Test de Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors)	
Estadístico	p-valor
0,063	0,2

A tenor del p-valor (superior al 5%), se puede admitir que X sigue una distribución Normal. Esto queda constatado con la observación del gráfico de probabilidad Normal (Figura 6).

Figura 6. Gráfico de probabilidad Normal para X = Peso de rebozado/gamba



Constatada la hipótesis, se está en disposición de realizar el gráfico de control \bar{x} -R. Su obtención permite:

- Estimar el peso medio de rebozado y la variabilidad del mismo.
- Estudiar la capacidad del proceso y así comprobar si el mismo cumple con las especificaciones.
- Dotar a la empresa de una herramienta que le permitirá realizar un seguimiento del proceso, comprobando si este sigue bajo control.

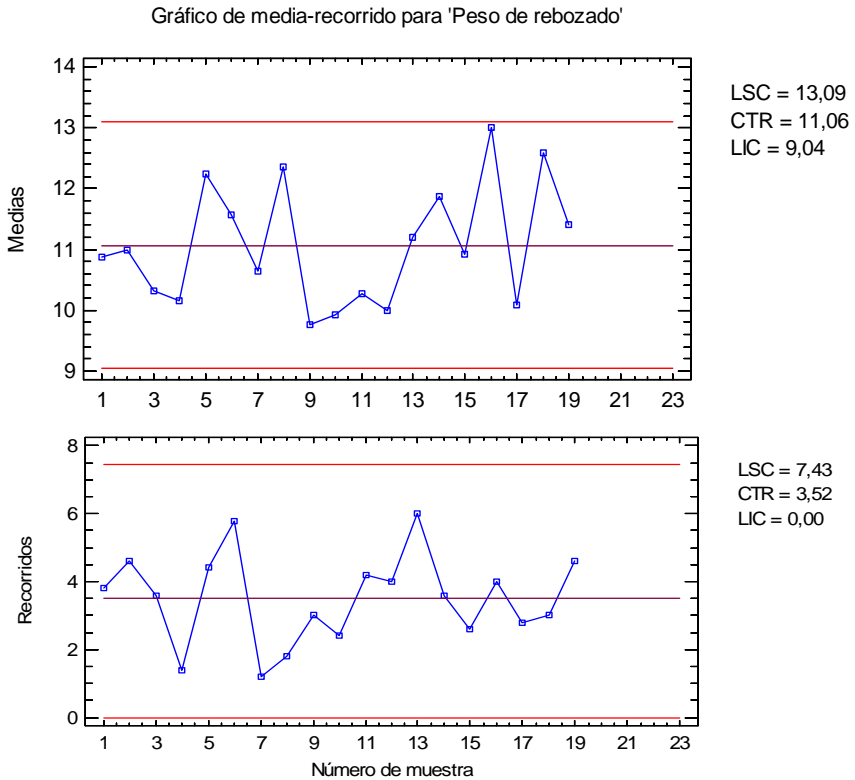
Dado que la media y el recorrido de la masa de peso de rebozado es desconocida se procede a estimarla. En este caso, tal y como se indicó anteriormente, se han considerado 34 muestras ($k = 34$) de tamaño 5 ($n=5$), de las que una vez calculadas las medias y recorridos se obtiene que:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{34}}{34} = 11,85$$

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_{34}}{34} = 4,28$$

Se calculan los límites del gráfico \bar{x} -R teniendo en cuenta que para el tamaño muestral considerado el valor de las constantes son: $A_2 = 0,577$; $D_3 = 0$ y $D_4 = 2,115$. Una vez obtenidos los límites se construye el gráfico de \bar{x} -R, observando un proceso que no opera bajo control ya que existen muchos puntos fuera de los límites de control tanto del gráfico media como del de recorrido, por lo que se eliminan los puntos y se recalculan los límites de control obteniendo el gráfico que se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Gráfico media-recorrido para el peso de rebozado



Se está, por tanto, en disposición de proceder a la estimación de los parámetros del proceso. En efecto:

$$\begin{aligned} \mu \text{ estimada} &= \bar{\bar{X}} = 11,06 \text{ g} \\ \sigma \text{ estimada} &= \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{3,52}{2,326} = 1,51 \text{ g} \end{aligned}$$

Es decir, se estima que, por término medio el peso de la masa de rebozado del producto es de 11,06 g por gamba y que la variabilidad estimada de dicho peso, medida a través de su desviación estándar es de 1,51g.

Una vez estimados los parámetros del proceso se puede proceder a realizar un estudio de la capacidad del mismo y un análisis del coste derivado de la no calidad mediante la función de pérdida de Taguchi. Para el estudio de la capacidad del proceso se tendrá en cuenta el valor de los límites de tolerancia, que se corresponden con las especificaciones para el peso de rebozado proporcionadas por la empresa (LTI = 9,99 g, LTS = 13 g), al tiempo que se analizará el centramiento del proceso.

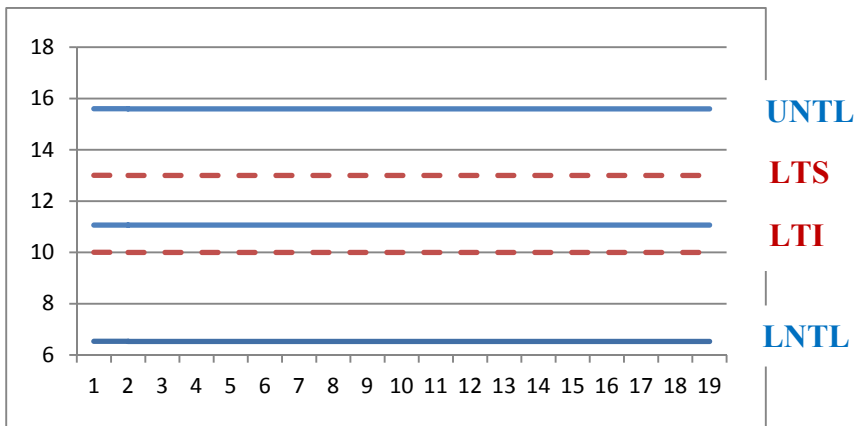
Tras el cálculo de los índices de capacidad potencial y real, se determinará en el caso que proceda, el porcentaje de variabilidad que es necesario disminuir para que el proceso funcione correctamente.

Así, para analizar si el proceso está centrado bastará con comprobar si la media (μ) estimada coincide con el punto medio del intervalo de tolerancia ($\frac{LTS+LTI}{2}$). En este caso:

$$\begin{aligned}\mu \text{ estimada} &= 11,06 \text{ g} \\ \text{punto medio del intervalo de tolerancia} &= \frac{13+9,99}{2} = 11,5\end{aligned}$$

Por lo tanto, el proceso no está centrado ya que ambos valores no coinciden. Además, tal y como se observa en la Figura 8 los límites de tolerancia se encuentran entre los límites de tolerancia natural ($LNTL = \mu - 3\sigma = 6,53$ y $UNTL = \mu + 3\sigma = 15,59$).

Figura 8. Límites inferior y superior de Tolerancia natural y de Tolerancia



Esto es, existe un exceso de variabilidad. Este hecho es constatado por el valor del índice de capacidad potencial (inferior a la unidad)

$$C_p = \frac{LTS - LTI}{6\sigma} = \frac{13 - 9,99}{6 \cdot 1,51} = 0,76$$

Si se calcula el índice de capacidad real

$$\begin{aligned}C_{pk} &= \min\left(\frac{LTS - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LTI}{3\sigma}\right) = \min\left(\frac{13 - 11,06}{3 \cdot 1,51}, \frac{11,06 - 9,99}{3 \cdot 1,51}\right) \\ &= \min(0,43; 0,23) = 0,23 < 1\end{aligned}$$

Se deduce que el proceso no siendo realmente capaz, incumple con respecto a los dos límites de tolerancia. El valor mínimo (0,23) indica que el proceso incumple en mayor medida respecto a LTI.

Por lo tanto es necesario disminuir la variabilidad. Con la finalidad de cuantificar dicha disminución, se tiene en cuenta que en términos de calidad se exige que el índice de capacidad potencial debe ser igual o superior a 1,33, por lo que teniendo en cuenta la definición de dicho indicador ($\frac{LTS-LTI}{6\sigma}$) el valor de σ debería ser 0,376, lo que supone una disminución de la variabilidad de un 75,1%. Se propone, por tanto a la empresa que tome las medidas necesarias (inversión en tecnología, formación de operarios,...) para lograr dicha disminución.

Si se consiguiera, entonces

$$C_p = \frac{13 - 9,99}{6 \cdot 0,376} = 1,33$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{13 - 11,06}{3 \cdot 0,376}, \frac{11,06 - 9,99}{3 \cdot 0,376}\right) = \min(1,71; 0,95) = 0,95 < 1$$

Es decir, el proceso aunque potencialmente capaz no sería realmente capaz y, además, seguiría sin cumplir especificaciones respecto al límite de tolerancia inferior ya que $\frac{\mu-LTI}{3\sigma} < 1$.

Así, siendo el proceso potencialmente capaz, pero no realmente, a pesar de la supuesta disminución de la variabilidad, la solución podría pasar por conseguir un centramiento del proceso, pues en ese caso los índices de capacidad coincidirían, siendo ambos superiores a la unidad. Se propone igualmente a la empresa la toma de medidas necesarias (reajuste de maquinaria, revisión de contratos con proveedores,...) que permita centrar el proceso.

Por otra parte, y siguiendo con el esquema del trabajo, para llevar a cabo el análisis del coste de la no calidad se tendrá en cuenta que la empresa ha cifrado el coste unitario derivado de la no consecución del objetivo ($b=11,5$ g.) en 0,0889 €, por lo que el valor del coeficiente de pérdida (K) es:

$$K = \frac{L}{(x - b)^2} = \frac{0,0889}{(13 - 11,5)^2} = 0,0395$$

Así la estimación de la pérdida media unitaria (suponiendo que se ha conseguido una disminución de σ , pasando ésta a valer 0,376) es

$$K(\sigma^2 + (\mu - b)^2) = 0,0395(0,376^2 + (11,06 - 11,5)^2) = 0,0131$$

Es decir, se estima que, debido al descentramiento del proceso y la variabilidad del mismo, por término medio se pierde 0,0131 € por unidad. Esta cantidad, que en principio podría considerarse pequeña, es realmente elevada si se tiene en cuenta el número de gambas rebozadas producidas diariamente, ya que en una producción de 1700 kg de gamba se estima que se perdería 1224 €.

Por otra parte, con objeto de solucionar el problema detectado, se procede a comprobar en qué sentido deben ir dirigidas las medidas a adoptar, si a disminuir prioritariamente el descentramiento o el exceso de variabilidad. Teniendo en cuenta que la pérdida media unitaria obedece a la expresión:

$$K(\sigma^2 + (\mu - b)^2) = k\sigma^2 + k(\mu - b)^2$$

Es decir, se descompone en dos factores, uno dependiente de la variabilidad y otro del descentramiento, bastará con ver cuál de los dos tiene mayor peso en el cómputo final. Dado que

$$\frac{K\sigma^2}{K(\mu - b)^2} = \frac{0,0395 \cdot 0,376^2}{0,0395(11,06 - 11,5)^2} = 0,74 < 1$$

Se deduce que habría que adoptar medidas destinadas a disminuir el descentramiento prioritariamente.

4.4. Comprobación de la existencia de factores que influyan en el producto final

Debido a la elevada variabilidad detectada en el proceso, se va a comprobar si existe algún factor, dentro del proceso de producción, que pudiera afectar significativamente a dicha variabilidad.

Para ello se ha tenido en cuenta que la elaboración de la gamba rebozada no se realiza en un único punto del proceso, sino que existen 5 puestos de elaboración de gamba rebozada, realizándose en cada uno de estos puestos las acciones correspondientes a las etapas de rebozado y fritura del producto (ver Figura 2). Así, se desea comprobar si el factor puesto de elaboración influye sobre la característica "peso de rebozado/gamba". Se hará uso, para ello, de un análisis de la varianza (ANOVA).

Por lo que las hipótesis (nula y alternativa) explícitamente son:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$
$$H_1: \text{al menos dos de las medias no son iguales}$$

Siendo μ_i el peso medio de rebozado correspondiente al puesto i -ésimo en la línea de fabricación ($i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$).

Para la realización del ANOVA es necesaria la comprobación previa del cumplimiento de las hipótesis de partida (Normalidad de las poblaciones y homocedasticidad). Para la constatación de las hipótesis de normalidad y homocedasticidad se utilizan el test de

Kolmogorov–Smirnov con la corrección de Lilliefors y el test de Levenne respectivamente, obteniendo los resultados que se reflejan en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para X=peso rebozado/gamba (en los 5 puestos de elaboración)

Test de Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors)					
Puesto	1	2	3	4	5
Estadístico	0,628	0,455	0,820	0,478	0,653
p-valor	0,825	0,986	0,512	0,976	0,788

Tabla 4. Prueba de Levenne

Test de Levenne			
Estadístico	gl1	gl2	p-valor
0,269	4	85	0,897

Por lo que a tenor de los p-valor correspondientes no se rechaza la hipótesis de normalidad para ninguna de las 5 poblaciones consideradas ni el de homocedasticidad.

Por consiguiente, constatadas las hipótesis de partida, se procede a realizar el análisis de la varianza de los datos, cuyo resultado se recoge en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de la Varianza (factor: puesto de elaboración)

	Suma de Cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-valor
Entre- grupos	15,376	4	3,844	0,716	0,583
Intra -grupos	456,133	85	5,366		
Total	471,509	89			

Dado que el p-valor es superior al 5% se concluye que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre el peso medio de masa entre un puesto de elaboración y otro, con un nivel de significación del 5%. Esto es, el factor "puesto de elaboración" no afecta al output "peso de la masa de rebozado/gamba".

5. Conclusiones

El control y la mejora del proceso productivo de cola de gamba rebozada se han logrado gracias a la aplicación secuencial de distintas herramientas estadísticas.

La realización del diagrama de flujo del proceso ha permitido identificar todas las etapas del mismo y observar que en el rebozado y la fritura existen problemas que llevan a la

producción de elementos defectuosos. Por lo que se han realizado muestreos de producto final para poder contabilizar, gracias a la hoja de control, los 10 tipos de defectos detectados durante la producción. Así tras la contabilización se ha determinado, aplicando el diagrama de Pareto, que los tipos de defectos más habituales son colas negras, calvas en la cabeza, lomo sin rebozar y marcas de cinta que abarcan el 40% de las causas; al priorizar la actuación sobre la solución de estas causas se resolverían el 75% de los defectos.

Se ha estimado la proporción de elementos defectuosos en un 32% mediante el gráfico del control p , el cual permitirá a la empresa observar cómo evoluciona la proporción a lo largo del tiempo y observar si la actuación sobre las causas de los tipos de defectos más habituales ha sido eficaz.

El estudio de la característica de calidad “peso de rebozado/gamba” (atribuida a algunos tipos de defectos) realizado mediante el gráfico de control \bar{x} - R ha permitido detectar la existencia de una gran variabilidad en el proceso. El uso de dicha herramienta ha proporcionado también la estimación del peso medio de masa de rebozado por gamba, así como la variabilidad de la característica de calidad analizada, medida a partir de su desviación típica, siendo 11,06 g y 1,51 g respectivamente.

En cuanto al estudio de capacidad realizado, éste muestra que el proceso, estando bajo control, no cumple especificaciones respecto a los límites de tolerancia inferior (9,99 g) y superior (13 g). El proceso tampoco está centrado ya que el valor objetivo del peso de masa de rebozado es 11,5 g. Para que el proceso pasara a ser potencialmente capaz se ha concluido que sería necesario disminuir la variabilidad en un 75%. Sin embargo, de ser posible dicha disminución, el proceso no sería realmente capaz, pues seguiría sin cumplir especificaciones respecto al límite de tolerancia inferior. Se aconseja, por tanto, que además de las medidas enfocadas a disminuir la variabilidad en el 75%, se adopten otras dirigidas a lograr un centramiento del proceso, por ejemplo, realizando inversión en mantenimiento y ajustando la maquinaria o formando a los trabajadores.

Además, haciendo uso de la función de pérdida de Taguchi, se estima que se pierde 0,0131€ en la fabricación de cada gamba que no cumple con el valor objetivo de peso de rebozado, lo que supone una pérdida estimada de 1224€ diarios.

Por último, dada la alta variabilidad detectada en el proceso, se pretendía constatar la existencia de factores que influyeran en el producto final. Dado que el único factor diferenciador, en principio, es el factor puesto de elaboración, analizado si dicho factor influye en la variable peso de rebozado, mediante un ANOVA, se concluye que no existen diferencias significativas en el peso medio de rebozado entre los distintos puestos de elaboración (con un nivel de significación del 5%).

Finalmente, y a modo de sugerencia, sería conveniente seguir aplicando los gráficos del control, tanto el gráfico p como el gráfico \bar{x} - R , para analizar la evolución del proceso. También sería interesante la extrapolación de la metodología utilizada en el presente estudio al resto de líneas de fabricación (en las que se elaboran otro tipo de producto), con el objetivo de poder controlar y mejorar todos los procesos de la empresa.

Referencias

- Besterfield, D., Besterfield, C., Besterfield, G. y Besterfield, M. (2011). *Total quality management*. India: Pearson Education.
- Botero, M., Arbeláez, O. y Mendoza, J. (2007). Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Scientia et Technica Año XIII*(37), 533-537.
- Caicedo, N. (2011). Aplicación de un programa Seis Sigma para la mejora de calidad en una empresa de confecciones. *Prospect*, 9(2), 65-74.
- Calcutt, R. (1995). The rights and wrongs of control charts. *Applied Statistics*, 44(3), 279-288.
- Carot, V. (1998). *Control estadístico de la calidad*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Galgano, A. (1995). *Los 7 instrumentos de la calidad total*. Madrid: Díaz de Santos.
- Huerga, C., Blanco, P. y Abad, J. (2005). Aplicación de los gráficos de control en el análisis de la calidad textil. *Pecvnia*, (1), 125-148.
- Huerga, C., Abad, J.I. y Blanco, P. (2012). El papel de la estadística en la metodología Seis Sigma. Una propuesta de actuación en servicios sanitarios. *Pecvnia Monográfico*, (1), 111-136.
- Ishikawa, K. (1989). *Introducción al control de calidad*. Madrid: Díaz de Santos.
- López R.F. (2003). Taguchi, la calidad en cifras. *Qualitas hodie: Excelencia, desarrollo sostenible e innovación*, (89), 76-78.
- López Rodríguez, M.I. y Guerola Adell, E. (2013). Control cuantitativo de la calidad en una empresa del sector servicios. *Pecvnia*, (16/17), 197-215.
- Montgomery, D. (2010). *Control estadístico de la calidad*. México: LimusaWiley.
- Orlandoni, G. (2012). Gestión de la calidad: Control estadístico y Seis Sigma. *Telos*, 14(2), 269-274.
- Riu, J. (2005). Gráficos de control de Shewhart. *Técnicas de Laboratorio*, (306), 1016-1019.
- Shewhart, W.A. (1931; rpt.1980). *Economic control of quality of manufactured product*. Milwaukee, Wis: ASQC Quality Press.
- Taguchi, G. (1987). *Introducción a la ingeniería de calidad*. Monterrey: Centro de Calidad, DGI-ITESM.
- Tolamatl, J., Gallardo, D., Varela, J.A. y Flores, E. (2011). Aplicación de Seis Sigma en una microempresa del ramo automotriz. *Conciencia Tecnológica*, (42), 11-18.
- Valderrey, P. (2012). *Herramientas para la calidad total*. Madrid: Starbook.

ANEXO

Tabla de coeficientes para gráficos de control

n	c ₄	d ₂	d ₃	A ₂	A ₃	B ₃	B ₄	D ₃	D ₄
2	0,7979	1,128	0,853	1,880	2,659	0	3,267	0	3,267
3	0,8862	1,693	0,888	1,023	1,954	0	2,568	0	2,575
4	0,9213	2,059	0,880	0,729	1,628	0	2,266	0	2,282
5	0,9400	2,326	0,864	0,577	1,427	0	2,089	0	2,115
6	0,9515	2,534	0,848	0,483	1,287	0,030	1,970	0	2,004
7	0,9594	2,704	0,833	0,419	1,182	0,118	1,882	0,076	1,924
8	0,9650	2,847	0,820	0,373	1,099	0,185	1,815	0,136	1,864
9	0,9690	2,970	0,808	0,337	1,032	0,239	1,761	0,184	1,816
10	0,9727	3,078	0,797	0,308	0,975	0,284	1,716	0,223	1,777
11	0,9754	3,173	0,787	0,285	0,927	0,321	1,679	0,256	1,744
12	0,9776	3,258	0,778	0,266	0,886	0,354	1,646	0,284	1,719
13	0,9794	3,336	0,770	0,249	0,850	0,382	1,618	0,308	1,692
14	0,9810	3,407	0,763	0,235	0,817	0,406	1,594	0,329	1,671
15	0,9823	3,472	0,756	0,223	0,789	0,428	1,572	0,348	1,652
16	0,9835	3,532	0,750	0,212	0,763	0,448	1,552	0,364	1,636
17	0,9845	3,588	0,744	0,203	0,739	0,466	1,534	0,379	1,621
18	0,9854	3,640	0,739	0,194	0,718	0,482	1,518	0,392	1,608
19	0,9862	3,689	0,734	0,187	0,698	0,497	1,503	0,404	1,596
20	0,9869	3,735	0,729	0,180	0,680	0,510	1,490	0,414	1,586
21	0,9876	3,778	0,724	0,173	0,663	0,523	1,477	0,425	1,575
22	0,9882	3,819	0,720	0,167	0,647	0,534	1,466	0,434	1,566
23	0,9887	3,858	0,716	0,162	0,633	0,545	1,455	0,443	1,557
24	0,9892	3,895	0,712	0,157	0,619	0,555	1,445	0,452	1,548
25	0,9896	3,931	0,708	0,153	0,606	0,565	1,435	0,459	1,541

Fuente: Montgomery (2010).