

Aplicación de herramientas para el desarrollo de una metodología para el análisis de la variación de pesos en máquinas envasadoras en la empresa “Campo Fresco”

MC. Joel Everardo Valtierra Olivares¹, Dr. José Manuel Sausedo Solorio²

Resumen—P En el presente trabajo de investigación se utilizó la estrategia de la metodología DMAIC, las herramientas aplicadas en este proyecto fueron el estudio de capacidad del proceso, los estudios Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) y el análisis de la varianza (ANOVA). El uso de estas herramientas ayudó a controlar la variación de pesos entre los cinco vasos dosificadores de la máquina envasadora de semillas en la empresa “Campo Fresco”. La actividad de dicha empresa es envasar semillas como frijol, arroz, lenteja y otras semillas en bolsas de plástico en diferentes presentaciones. En Campo Fresco se tuvieron problemas de calidad debido a la variación de pesos de sus productos, esta situación estaba causando clientes insatisfechos. Al realizar las inspecciones del producto terminado se encontraron pesos inferiores al especificado, la acción correctiva de la empresa fue trabajar por arriba del peso establecido, esto ocasionó pérdidas de producto en cada bolsa terminada. Con lo anterior, se elaboró una metodología para garantizar que la diferencia significativa de variación de peso entre los cinco vasos dosificadores que tiene cada máquina envasadora sea mínima. La metodología elaborada fue utilizada para arrancar máquinas envasadoras nuevas, y realizar los ajustes necesarios después de los cambios de presentación del producto, así como ajustes después del mantenimiento a las máquinas envasadoras.

Palabras clave—Metodología DMAIC, Capacidad del proceso (C_p , C_{pk}), Estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), Análisis de la varianza (ANOVA).

Introducción

La competitividad global ha provocado que muchas empresas mejoren sus procesos con el objetivo de tener un mayor margen de ganancias y lograr permanecer en un mercado cada día más competitivo. La realización de proyectos que mejoren los procesos de producción con un mínimo de inversión, son necesarios para que las empresas sigan permaneciendo en la actualidad, donde no es suficiente incrementar el precio del producto sino reducir los costos de producción.

La metodología DMAIC³ se realiza en cinco etapas las cuales son: definir, medir, analizar, implementar y controlar. En la primera etapa Definir se establece la variable a analizar durante el proyecto, se selecciona la variable de pesos que existe entre los vasos dosificadores de la máquina envasadora. En la segunda etapa Medir se propone realizar un estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) para validar el sistema de medición sobre la variable a medir, con esto se garantiza que los datos recabados sean confiables. Para el proyecto se estudió las lecturas de los trabajadores, el producto terminado y el instrumento de medición (báscula). En la tercera etapa Analizar se propone un estudio de capacidad del proceso para determinar si la máquina cumple con las especificaciones del producto terminado y determinar si está centrado el proceso, los valores esperados en los indicadores deben ser mayores a 1.33. Enseguida se realiza un análisis de varianza (ANOVA), este estudio ayuda a determinar si existe una diferencia significativa entre los tratamientos, esto aplicado al proyecto sirve para determinar que los vasos dosificadores necesitan ajustarse para igualar su peso a los demás vasos dosificadores. En la cuarta etapa de Implementar se proponen soluciones al problema presentado, para realizar este paso fue necesario realizar un procedimiento de ajuste de vasos dosificadores. En la quinta fase de Control se realizan los reportes de los análisis para evidenciar que la implementación se encuentra dentro del control.

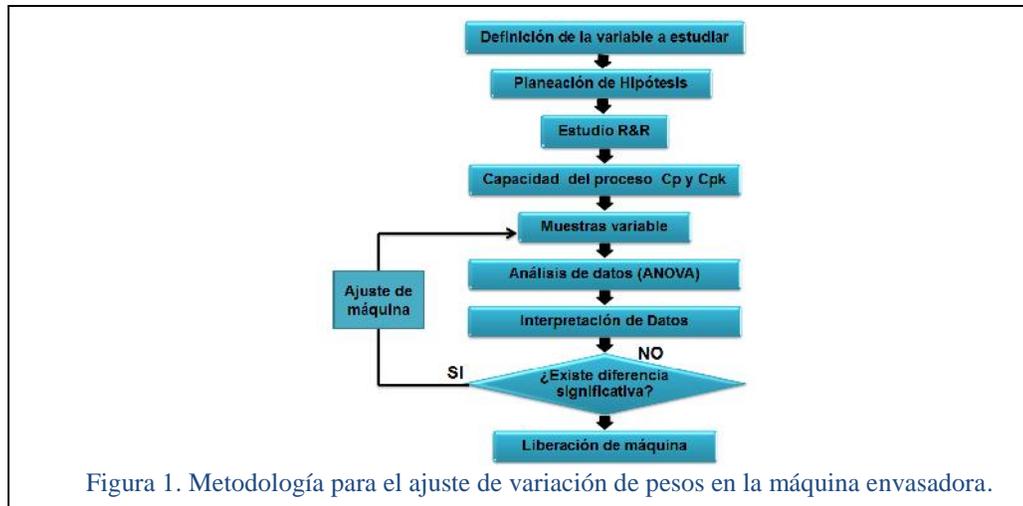
A continuación se propone el uso de una metodología nueva para validar que no existe diferencia significativa cuando las máquinas producen más de una pieza a la vez.

Metodología

Se desarrolló una metodología adecuada que permita dar una apropiada solución al problema de las diferencias de pesos entre los vasos dosificadores de las máquinas envasadoras que repercute en la variación de pesos de los productos terminados. En la figura 1 se muestra la metodología propuesta basada en la estrategia DMAIC³ de Lean Six Sigma.

¹ Joel Everardo Valtierra Olivares MC. es Profesor de Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Guanajuato. jovaltierra@itesis.edu.mx (autor correspondiente)

² José Manuel Sausedo Solorio Dr. es Profesor de Ingeniería Industrial en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. sausedo@uaeh.edu.mx



Paso 1. Definición de la variable a analizar.

En esta paso se definen las variables a estudiar y se determinan las variables de respuesta que se desean mejorar. También se definen los factores que intervienen en el proceso y que afectan a la variable de respuesta.

Paso 2. Planeación de Hipótesis.

El planteamiento de hipótesis es el punto de partida para cualquier prueba, y en las pruebas estadísticas inferenciales existen dos hipótesis que deben definirse antes de hacer el análisis correspondiente:

H_0 : Es la hipótesis de igualdad o nula entre los grupos de datos estadísticos que estén siendo comparados.

H_1 : Es la hipótesis alterna o de diferencia, y representa aquello que se pretende probar mediante la evidencia estadística.

Paso 3. Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R).

En los estudios (R&R) se trata de evaluar en forma experimental qué parte de la variación total observada en los datos son atribuibles al error de medición y cuantificar si este error es mucho o poco, comparado con la variabilidad del producto y con las tolerancias de la característica de calidad que se mide. Las fuentes de variabilidad que se pueden evaluar en un estudio de (R&R) son: la variabilidad del producto, la variabilidad del instrumento y la variabilidad de los operadores. Sean σ_{total}^2 (1) la variabilidad total, σ_{prod}^2 la variación atribuible al producto (parte o pieza), σ_{instr}^2 (2) la variabilidad del instrumento de medición y σ_{oper}^2 la varianza debida a operadores (Gutiérrez y De la Vara 2004). Se cumple la siguiente relación:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{prod}^2 + \sigma_{oper}^2 + \sigma_{instr}^2 \tag{1}$$

donde

$$\sigma_{instr}^2 = \sigma_{repeti}^2 \text{ y } \sigma_{oper}^2 = \sigma_{reprod}^2 \tag{2}$$

por tanto,

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{repeti}^2 + \sigma_{reprod}^2 \tag{3}$$

Existen dos tipos de estudios R&R, los cuales son: el corto y el largo. El estudio R&R largo es el más completo y por ende el más recomendable, debido a que permite tener una evaluación para cada una de las tres fuentes de variabilidad referidas antes, en particular de la repetibilidad y la reproducibilidad. Mientras que en el estudio R&R corto, que es menos recomendable, sólo se logra evaluar la variabilidad atribuible al proceso de medición sin distinguir qué parte se debe al instrumento y cuál al operador.

Paso 4. Capacidad del proceso C_p & C_{pk} .

Los procesos industriales tienen variables de salida o de respuesta, las cuales deben cumplir con ciertas especificaciones para así considerar que el proceso está funcionando de manera satisfactoria. Evaluar la habilidad o capacidad de un proceso es analizar qué tan bien cumple sus variables de salida con las especificaciones. El índice de capacidad del proceso, C_p (4), se define de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{ES - EI}{6\sigma} \tag{4}$$

Donde σ representa la desviación estándar del proceso, y ES y EI son las especificaciones superior e inferior para la característica de calidad. En el cuadro 1 se presentan cinco categorías de procesos que dependen del valor del índice C_p , suponiendo que el proceso está centrado.

Valor del índice C_p (corto plazo)	Decisión (proceso centrado)
$C_p \geq 2$	Se tiene calidad de seis sigma
$C_p > 1.33$	Adecuado
$1 < C_p < 1.33$	Parcialmente adecuado. Requiere de un control estricto.
$0.67 < C_p < 1$	No adecuado para el trabajo. Requiere un análisis para alcanzar una calidad satisfactoria.
$C_p < 0.67$	No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias.

Cuadro 1. Interpretación de los valores del C_p .

La desventaja del índice C_p es que no toma en cuenta el centrado del proceso. Para superar esta desventaja será necesario recurrir al índice de capacidad real C_{pk} (6). Para calcularlo se requiere determinar un índice de capacidad inferior, C_{pi} (5), y otro para el superior, C_{ps} (5), de la siguiente manera:

$$C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3\sigma} \quad \text{y} \quad C_{ps} = \frac{ES - \mu}{3\sigma} \tag{5}$$

Como se observa, estos índices si toman la media del proceso y evalúan la capacidad para cumplir con las especificaciones inferiores y superiores, respectivamente. La distancia de la media del proceso a una de las especificaciones representada la variación tolerada para el proceso de un solo lado de la media. Por eso se divide entre 3 en lugar de 6. De aquí que entre más grandes sean estos índices, mejor se cumplirá con la especificación. El índice C_{pk} (6) está definido por:

$$C_{pk} = \text{Al valor más pequeño entre } C_{pi} \text{ y } C_{ps} \tag{6}$$

El índice C_{pk} es igual al índice unilateral más malo, por lo que si el valor del C_{pk} es satisfactorio, eso indicara que el proceso en realidad es capaz. Si no es satisfactorio, no cumple con por lo menos una de las especificaciones (Gutiérrez y De la Vara 2004).

Paso 5. Muestra de la variable a analizar.

Una decisión importante en cualquier diseño de experimentos es determinar el número de réplicas que se debe realizar por cada tratamiento (tamaño de la muestra). Por lo general, si se esperan diferencias pequeñas entre tratamientos entonces es necesario un tamaño de muestra mayor. Si recurrimos a la mayoría de las situaciones experimentales en las que se involucran un factor varía entre cinco y diez (Gutiérrez 2004).

La elección del tamaño de la muestra por intervalos de confianza, supongamos que el experimentador ya tiene el número de tratamientos que desea probar, k, y que tomando las consideraciones dadas antes tiene una propuesta inicial del número de réplicas que va a utilizar, n_0 . También tiene una idea aproximada del valor de σ (la desviación estándar del error aleatorio), y tiene una idea de la magnitud de las diferencias, d_T , entre tratamientos que le interesa detectar. Utilizando las pruebas de rangos múltiples (7) donde la diferencia mínima significativa entre tratamientos está dada por la siguiente ecuación:

$$LSD = t_{(\alpha/2, N-k)} \sqrt{2CM_E / n} \tag{7}$$

despejando n (7) de aquí obtenemos (8):

$$n = \frac{2(t_{(\alpha/2, N-k)})^2 CM_E}{(LSD)^2} \tag{8}$$

Si la significancia es $\alpha=0.05$, entonces en esta fórmula se van a hacer las siguientes sustituciones: $N=k \times n_0$, $CM_E = \sigma^2$, $LSD = d_T$; de esta forma el tamaño de muestra que tentativamente se debe usar está dado por:

$$n = \frac{2(t_{(0.025, k \times n_0 - k)})^2 \sigma^2_E}{(d_T)^2} \tag{9}$$

El valor de n arrojado por esta fórmula dará una idea del número de réplicas por tratamientos de acuerdo a las consideraciones iniciales que se refleja a través de (k, n_0, d_T) (Gutiérrez 2004).

Paso 6. Análisis de varianza (ANOVA).

Se podría pensar que una forma de probar la hipótesis nula de la expresión es mediante pruebas T de Student, aplicada a todos los posibles pares de medias. Pero esta manera de proceder incrementaría considerablemente el error tipo I (rechazar H_0 siendo verdadera). Por otra parte, existe un método capaz de probar la hipótesis de igualdad de las k medias, con un solo estadístico de prueba, éste es el llamado análisis de varianza cuadro 2 (Gutiérrez 2004).

El procedimiento de análisis estadístico denominado análisis de la varianza (análisis de las diferencias entre tratamientos) que permiten probar la hipótesis que se plantea en un diseño de un factor con dos o más niveles. (Castaño y Domínguez 2003).

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0
Entre los tratamientos	$SS_{\text{Tratamiento}} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	a-1	$MS_{\text{Tratamientos}}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_e}$
Error (dentro de los tratamientos)	$SS_e = SS_T - SS_{\text{Tratamiento}}$	N-a	MS_e	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2$	N-1		

Cuadro 2. Análisis de varianza para un solo factor.

Paso 7. Interpretación de datos.

La interpretación de los resultados puede hacerse en función solamente del estadístico F y en función del valor p que también se determina en base al estadístico F: si $F_0 < F_{\alpha, a-1, N-a}$, no se rechaza la hipótesis nula ya no hay suficiente evidencia estadística para asegurar que existe efecto sobre la respuesta. De lo contrario, se acepta la hipótesis alternativa ya que si habría evidencia estadística para afirmar que existe efecto significativo sobre la respuesta (Montgomery 2011).

Paso 8. Ajuste de la máquina.

En el caso de rechazar la hipótesis nula donde se afirma que en caso existir diferencia significativa, se procederá a realizar ajustes a la máquina y regresar al paso 5, si es aceptada la hipótesis nula se pasara al siguiente paso.

Paso 9. Liberación de máquina.

Para liberar la máquina será necesario realizar un reporte de los estudio realizados, con esto se justificará que la máquina está ajustada y se garantizará que no existe diferencias significativa entre los tratamientos.

Aplicación de la metodología

Siguiendo la metodología antes mencionada en esta sección, se demuestran los resultados que se obtienen al realizar los ajustes en los vasos dosificadores para reducir la variación entre pesos del producto terminado de los cinco vasos. A continuación se muestra un ejemplo de los vasos dosificadores figura 2.

Paso 1. Definición de la variable a analizar.

Para realizar el estudio se seleccionó una máquina al azar de la empresa.



Paso 2. Planeación de Hipótesis.

De acuerdo al objetivo planteando en la definición del problema, se establece la hipótesis nula e hipótesis alterna para probar la existencia o no de efectos significativos del factor operativo sobre la variable de respuesta:

H_0 : No existe diferencia significativa entre los pesos de los cinco vasos dosificadores (10).

H_1 : Si existe diferencia significativa entre los pesos de los cinco vasos dosificadores (11).

$$H_0 = \text{vaso1} = \text{vaso2} = \text{vaso3} = \text{vaso4} = \text{vaso5} \text{ (10) y } H_1 = \text{vaso1} \neq \text{vaso2} \neq \text{vaso3} \neq \text{vaso4} \neq \text{vaso5} \text{ (11)}$$

Paso 3 Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R).

El resultado de la variación total del estudio R&R realizado a los operadores, piezas e instrumento de medición fue de 3.87%. Para que un estudio R&R sea aceptable se requiere que su variación total sea menor del 10%, con esto se garantiza que no hay problemas con el sistema de medición de producción. Por lo tanto, fue obtenido fue satisfactorio.

Paso 4. Capacidad del proceso C_p & C_{pk} .

El resultado de estudio de capacidad determina que el indicador C_p tiene un valor de 0.83 y el indicador C_{pk} tiene un valor de 0.36, con estos indicadores menores al 1.33 se determinó que el proceso no es capaz de producir piezas de producto terminado y se deben realizar ajustes inmediatamente.

Paso 5. Muestra de la variable a analizar.

Se realizaron cinco réplicas de los vasos dosificadores de la máquina envasadora (Cuadro 2).

Vaso 1	500.6	503.9	505.4	503.9	504.8
Vaso2	507.9	510.7	509.9	509.2	502.5
Vaso3	509.3	507.4	509.4	512.2	511.3
Vaso4	522.9	524.3	521.4	520	523.4
Vaso5	511.7	509.8	506.7	506.9	508.5

Cuadro 2. Muestra de pesos de vasos dosificadores.

Paso 6. Análisis de varianza (ANOVA).

Los resultados obtenidos del ANOVA (Figura 3), demuestra que el vaso dosificado número 4 está desfasado de los demás vasos. Ver grafica de bigotes en la figura 3.

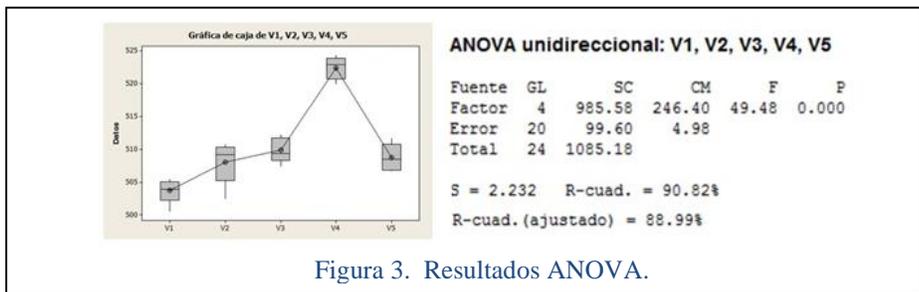


Figura 3. Resultados ANOVA.

Paso 7. Interpretación de datos.

Para responder a las hipótesis planteadas anteriormente se utiliza el análisis ANOVA Figura 3, las hipótesis planteadas son (10) y (11):

$$H_0 = \text{vaso1} = \text{vaso2} = \text{vaso3} = \text{vaso4} = \text{vaso5} \text{ (10) y } H_1 = \text{vaso1} \neq \text{vaso2} \neq \text{vaso3} \neq \text{vaso4} \neq \text{vaso5} \text{ (11)}$$

Para decidir si se acepta o se rechaza la hipótesis nula se utiliza la siguiente ecuación si $F_o < F_{0.5,4,20}$ se acepta H_0 , el valor de F_o es 49.48 y el F_{Tablas} es el cuales de 2.87, como conclusión se acepta la hipótesis alternativa al existir diferencia significativa en al menos en uno de los vasos dosificadores.

Paso 8. Ajuste de la máquina.

Se utilizó un procedimiento de ajuste de vasos dosificadores para la máquina envasadora, que fue desarrollado por los investigadores de este proyecto y es exclusivo de la empresa.

Paso 9. Muestra de la variable.

Se vuelve a tomar otra muestra de los pesos de cada vaso dosificador de la máquina en estudio cuadro 3.

Vaso 1	497.7	491.4	501.2	504.2	503.6
Vaso2	498.1	492.9	504.1	500.4	493.1
Vaso3	498.5	495.2	494.5	500.1	495.1
Vaso4	502.2	492.1	502.1	501.9	494.8
Vaso5	496.3	491.5	497	499.2	498.3

Cuadro 3. Muestra de pesos de vasos dosificadores después de ajuste.

Paso 10. Análisis de datos.

El resultado de los indicadores de capacidad son: $C_p = 2.04$ y el $C_{pk} = 1.81$ los cuales son mayores que el requerido de 1.33. El resultado del ANOVA (cuadro 4) determina que se acepta la hipótesis nula al no existir diferencia significativa entre los pesos de los vasos dosificadores. En base a los resultados obtenidos se liberó la máquina para que continúe trabajando.

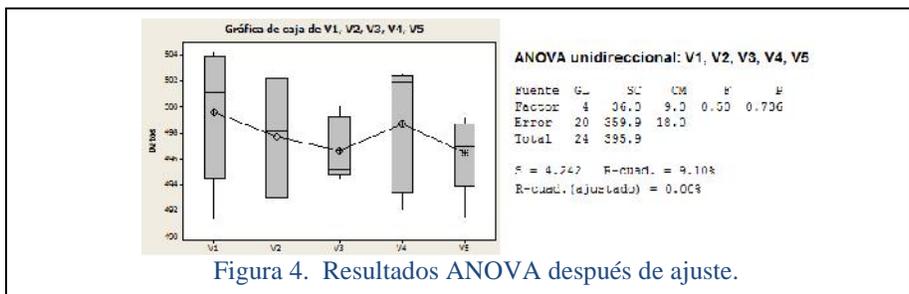


Figura 4. Resultados ANOVA después de ajuste.

Comentarios Finales

Resumen de resultados

El resultado de la investigación incluye el desarrollo de una metodología para realizar los ajustes necesarios en las máquinas envasadoras y así reducir la variación de pesos del producto terminado entre los vasos dosificadores. Los resultados mostraron que la metodología implementada fue satisfactoria.

Conclusiones

La importancia que tiene esta investigación es controlar la variación de pesos del producto terminado entre los vasos dosificadores en las máquinas envasadoras, con la reducción de la variación entre pesos se generan ahorros anuales por máquina de \$ 1,800,000 y un ahorro anual global de \$19, 800,000 por las 11 máquinas que tiene la empresa.

Recomendaciones

Esta metodología se recomienda utilizar para la liberación de máquinas envasadoras nuevas, también en los cambios de presentación de los productos, y después de realizar ajustes de mantenimiento en las máquinas. Esta metodología puede ser aplicada a otras máquinas que fabrique más de una pieza a la vez.

Referencias

¹ Gutiérrez, Humberto. y De La Vara, Román (2004). "Control estadístico de calidad y seis sigma" México: McGraw-Hill.
² Douglas C. Montgomery (2011). "Diseño y análisis de experimentos" México: Limusa.
³ Gutiérrez, Humberto. y De La Vara, Román (2004). "Análisis y diseño de experimentos " México: McGraw-Hill.
⁴ Castaño, Eduardo. y Domínguez, Jorge (2003). "Experimentos: estrategia y análisis en ciencia y tecnología. México: Centro de investigación en matemáticas, A.C.
⁵ Zertuche, Federico. y Valencias, Adriana (2011). "Aplicación del diseño de experimentos utilizado Análisis de varianza multivariada para la disminución de rechazo en un proceso del ramo automotriz", Revista de la Ingeniería Industrial ISSN 1940-2163, AcademiaJournal.com.

Notas Biográficas

El M.C. Joel Everardo Valtierra Olivares es profesor investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Su maestría en Ciencias en Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Celaya, de Guanajuato, México. Joel Valtierra proporciona servicios de consultoría en áreas de Lean, Six sigma, Control de Calidad, Simulación de procesos y Producción Total.

El Dr. José Manuel Sausedo Solorio es coordinador de la maestría en ciencias en ingeniería de manufactura del Instituto de ciencias básicas e ingeniería en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. El Dr. tiene maestría en ciencias computacionales en el I. T. S. M. y doctorado en Óptica, C.I.O. Centro de investigación en Óptica.