

Aplicación de un Diseño de Experimentos 2^k para la Optimización de un Proceso de Moldeo por Inyección

Gloria Paola Ortiz Espinoza, Carlos Anaya Eredias, Gilberto Ortiz Suárez, Pedro David Sánchez Pérez

Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Industrial, Rosales y Blvd. Luis Encinas S/N, C. P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.
gloriapa.ortizes@correoa.uson.mx, canaya@industrial.uson.mx,
gortiz@industrial.uson.mx, pedroda.sanchezpe@correoa.uson.mx

Resumen. Tener variabilidad en el proceso de producción es inevitable debido a inconsistencia en los parámetros de la máquina, la pieza de trabajo, materiales, herramientas y procesos. Cuando existe variación en el proceso el diseño de experimentos es una técnica estadística utilizada para determinar el ajuste óptimo de los factores que influyen al proceso, y de esta manera mejorar su funcionamiento, reducir su variabilidad y mejorar la manufactura de productos. El presente artículo se enfoca en la identificación, análisis y estudio de los factores principales que influyen durante el proceso de moldeo por inyección de la pieza 1-1532082-9 para que el producto cumpla con los requerimientos de calidad exigidos por el cliente.

Palabras Clave: Proceso, Moldeo por inyección, Diseño de experimentos, Factores

1 Introducción

Dentro de la empresa TE Connectivity se lleva a cabo el proceso de moldeo por inyección de la pieza 1-1532082-9, donde se observa que los diámetros superiores se encuentran fuera de especificación, es decir, no están dentro del rango de medida de 0.118 a 0.122 mm. Cuando la pieza no cumple con dicha especificación de calidad, ésta debe de ser retrabajada, sin embargo en ocasiones resulta imposible, y pasa a formar parte del desperdicio, generando costos de calidad para la empresa.

Este estudio tiene como objetivo identificar, analizar y estudiar los factores principales que influyen durante el proceso de moldeo por inyección de la pieza, para para que el producto cumpla con los requerimientos de calidad exigidos por el cliente. La estructura

Gloria Paola Ortiz Espinoza, Carlos Anaya Eredias, Gilberto Ortiz Suárez y Pedro David Sánchez Pérez, *Aplicación de un Diseño de Experimentos $2k$ para la Optimización de un Proceso de Moldeo por Inyección*, en: Alonso Perez-Soltero, Mario Barceló-Valenzuela, Oscar-Mario Rodríguez-Elias, German-Alonso Ruíz-Domínguez, Erica-Cecilia Ruiz-Ibarra, Ramón-René Palacio-Cinco (Eds.), Avances de Investigación en Ingeniería en el Estado de Sonora, pp. 11-20, 2014.

del artículo comienza con el marco teórico que proporciona el sustento necesario y suficiente para el desarrollo de un diseño de experimentos en un proceso de moldeo por inyección. Así mismo se explica la metodología a utilizar y se presentan el análisis de los datos. Para finalizar se presentan los resultados obtenidos durante el proyecto y se desarrollan las conclusiones del artículo.

2 Marco Teórico

La calidad de los productos y servicios se ha convertido en uno de los factores principales del funcionamiento óptimo de una organización, por lo que los fabricantes han tomado una creciente conciencia de la necesidad del mejoramiento continuo de sus procesos para obtener y mantener buenos resultados económicos en el desempeño de sus organizaciones [1].

El moldeo por inyección representa el proceso más importante para manufacturar partes plásticas debido a la facilidad de fabricación de artículos de alta calidad [2], además tiene algunas ventajas como una alta estabilidad dimensional, ciclos cortos de producción, superficies finas y limpias en los productos, moldeo fácil de formas complicadas y bajos costos en la producción [3], es por esto que para obtener una alta calidad en piezas moldeadas por inyección, el diseño de moldes, la materia prima, condiciones de procesamiento y el rendimiento de la máquina de inyección debe estar bien controladas para cumplir con las especificaciones requeridas.

2.1 Problemas en el Moldeo por Inyección

Los defectos de los productos, tales como deformaciones, encogimiento, marcas de hundimiento, y tensión residual son causados por diversos factores durante el proceso de producción. Estos defectos influyen en la calidad y la precisión de los productos, por lo tanto, es de suma importancia controlar eficazmente la influencia de los factores durante el proceso de moldeo [4]. La complejidad del proceso de moldeo por inyección y la enorme cantidad de manipulación de parámetros en tiempo real crean un esfuerzo muy intenso para mantener el proceso bajo control. Lo que es más, la complejidad y la manipulación de los parámetros pueden causar graves problemas de calidad y altos costos de fabricación [5].

El moldeo por inyección es un proceso cíclico inestable, sin embargo, la selección apropiada de los factores para su correcta operación, se hace más difícil conforme el diseño de la pieza de plástico se hace más delgada [6]. Debido a la complejidad del moldeo por inyección, numerosas propuestas y modelos matemáticos han sido ampliamente desarrollados ya que se han realizado numerosos estudios para el análisis de las diferentes etapas del proceso de moldeo por inyección [6].

2.2 Diseño de Experimentos

Tener variabilidad en el proceso de producción es inevitable debido a inconsistencia en los parámetros de la máquina, la pieza de trabajo, materiales, herramientas y procesos [7]. Cuando existe variación en el proceso el diseño de experimentos es una técnica estadística utilizada para determinar el ajuste óptimo de los factores que influyen al proceso, y de esta manera mejorar su funcionamiento, reducir su variabilidad y mejorar la manufactura de productos [8]. Es utilizado para entender las características del proceso y para investigar cómo las entradas afectan las respuestas basadas en antecedentes estadísticos, además de determinar los parámetros óptimos del proceso con un menor número de ensayos de prueba [9]. El diseño de experimentos es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores.

2.3 Diseño Factorial 2^k

Los diseños factoriales se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. El más importante de estos casos especiales es el de k factores, cada uno solo con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos, como dos valores de temperatura, presión o tiempo, o bien cualitativos, como dos máquinas, dos operadores, los niveles “alto” y “bajo” de un factor, o quizás la presencia o ausencia de un factor. Una réplica completa de este diseño requiere $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se le llama diseño factorial 2^k [10].

3 Descripción del Problema

El impacto negativo que se tiene cuando la pieza 1-1532082-9 no cumple con los requerimientos de calidad exigidos por el cliente se puede medir en dos formas:

1. En el departamento de moldeo los índices de desperdicio de silicón varían entre el 40% y 50% del material productivo, además, cuando la pieza puede ser retrabajada se invierte en promedio 20 horas a la semana para hacerlo.
2. El componente no se entrega a tiempo al ensamble final del número de parte 6-1532028-0 de la línea de producción Microdot, ocasionando que la orden no se pueda trabajar, incrementando de esta manera el WIP, es decir órdenes que no se han completado y están esperando su procesamiento posterior, y dejando sin embarcar 7,214 dólares americanos por cada orden, teniendo en total 17 ordenes sin trabajar acumulando 122,638 dólares americanos hasta el momento.

4 Implementación

En general la experimentación se hace de manera secuencial y antes de comenzar con el experimento se debe de cerciorar que los instrumentos de medición y la máquina con la que se va a trabajar estén dentro de periodo de calibración y mantenimiento. Esto ayudará a que la variable de respuesta sea más exacta y el error de medición disminuya. En la Figura 1 se muestra el esquema general del procedimiento para diseñar un experimento el cual comprende 5 pasos los cuales se describen a continuación:

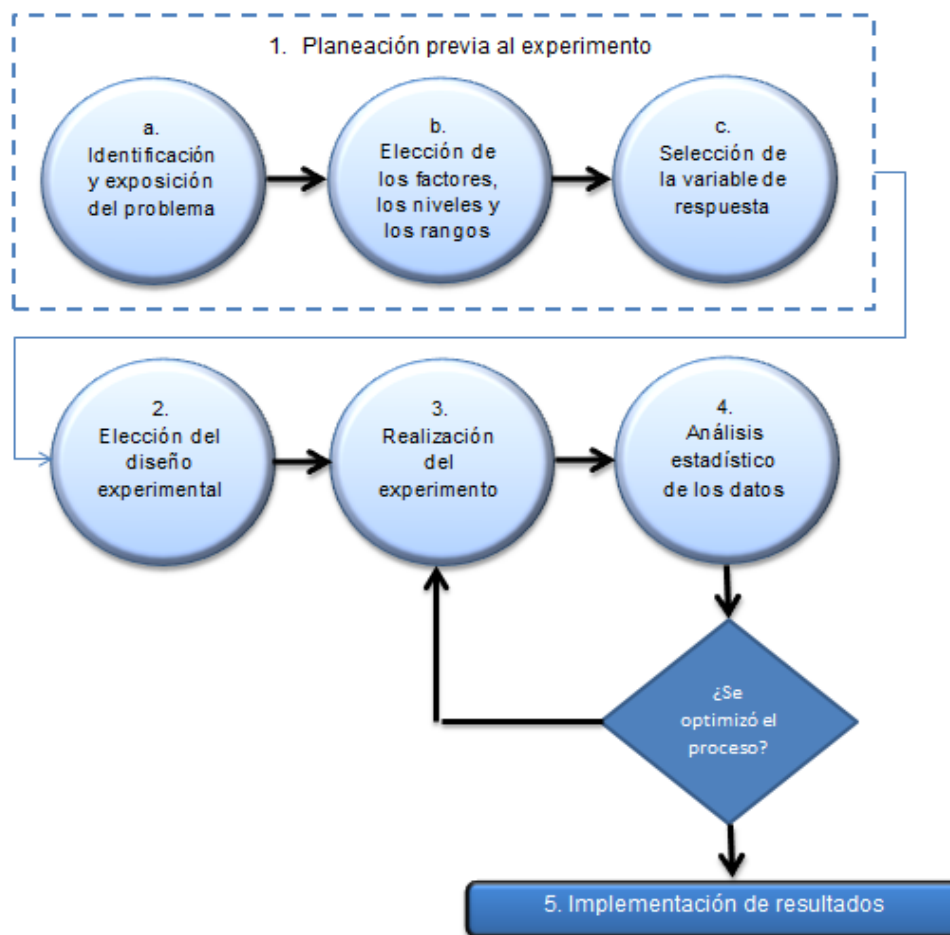


Figura 1. Metodología para realizar un diseño de experimentos

4.1 Planeación Previa al Experimento

Identificación y Exposición del Problema

Se recolectaron 90 datos de cada orificio obtenidos en 3 días de producción para los cuales se realiza un diagnóstico gráfico utilizando de las siguientes herramientas estadísticas: diagrama de dispersión y estudio de capacidad de proceso.

En la Figura 2, se muestra el diagrama de dispersión Orificio 1 vs Orificio 2 donde se observa la no existencia de correlación al no presentarse patrón entre las dos variables, y se puede decir que las variables tienden a ser independientes. Existen muy pocos puntos que están dentro del área de especificación, es decir, donde ambos orificios cumplen con la especificación de calidad y son piezas aceptables.

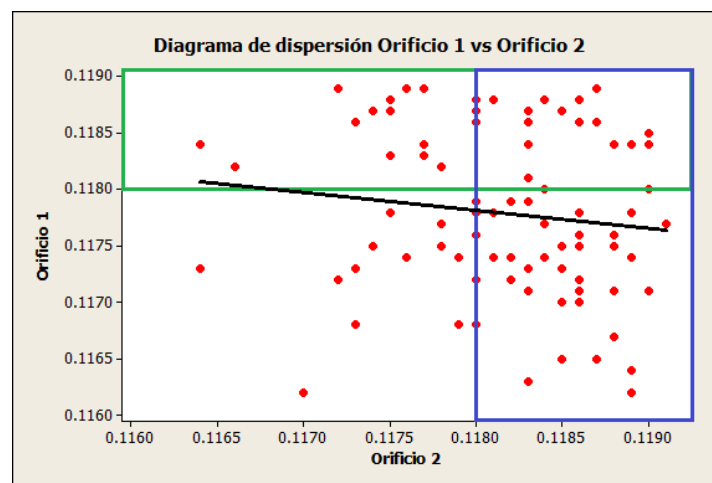


Figura 2. Diagrama de dispersión Orificio 1 vs Orificio 2

Además, se realizó un análisis de capacidad de proceso para ambos orificios y de acuerdo al gráfico obtenido se puede concluir lo siguiente: el comparativo que se realiza respecto a las especificaciones del producto nos indica que existe gran parte de las piezas que no cumplen con las especificaciones; el índice tanto de C_p como de C_{pk} refuerzan lo anterior al obtenerse valores de $C_p= 0.91$ y $C_{pk}= -0.10$ para el Orificio 1 de $C_p= 1.00$ y $C_{pk}= 0.08$ para el Orificio 2; las partes por millón totales de no conformidad es de 611,111 piezas para el Orificio 1 y 300,000 piezas para el Orificio 2, las cuales están por debajo de la especificación inferior.

Elección de los Factores, los Niveles y los Rangos

El criterio utilizado para establecer los factores tipo constantes o variables se llevó a cabo por medio de una entrevista con el Ingeniero de Moldeo, especialista y responsable del

16 Gloria Paola Ortiz Espinoza, Carlos Anaya Eredias, Gilberto Ortiz Suárez, Pedro David Sánchez Pérez

proceso de moldeo. En la Tabla 1 y 2 se muestran los factores que intervienen en el proceso y se clasifican en factores constantes o variables.

Tabla 1. Factores constantes que intervienen en el proceso de moldeo

Factores constantes	Valor Constante
Temperatura ambiental	18° C
Temperatura del barril	0° F
Tiempo de expulsión	1 seg
Presión del clamp	.90
Presión del colchón	1.00
Velocidad de cierre	2.85
Velocidad del tornillo	1
Pines utilizados	2 piezas
Fixtures	2 herramientas

Tabla 2. Factores variables que intervienen en el proceso de moldeo

Factores variables	Rango Inferior	Rango Superior
Temperatura por arriba del molde	345°F	375°F
Temperatura por abajo del molde	345°F	375°F
Tiempo de inyección	1 min	3 min
Tiempo de enfriamiento	1 min	3 min
Velocidad de inyección	1.5	2.5
Presión	1 bar	1.8 bar

Selección de la Variable de Respuesta

El diámetro de los orificios 1 y 2 de la pieza 1-1532082-9 deben estar dentro del rango de especificación de 0.118 a 0.122 mm que se exige de acuerdo al diseño y plano de la pieza.

4.2 Elección del Diseño de Experimento

Para analizar el problema que se tiene en el proceso de moldeo por inyección, se realiza un primer diseño de experimentos llamado “corrida de exploración”. El diseño es un experimento 2^3 y contiene 5 corridas que se realizan en los puntos centrales de los parámetros.

4.3 Análisis Estadístico de los Datos

Después de realizar el primer diseño de experimentos o corrida de exploración, se midió el diámetro de los orificios 1 y 2 de cada pieza. Se utilizó el software Minitab para analizar los datos y realizar un Análisis de Varianza para cada orificio y se observa que no se muestra ningún parámetro significativo ya que $P \geq 0.05$, por lo que se realizó un análisis más detallado del proceso para detectar algún otro factor que no se estaba

tomando en cuenta. Se analizaron las herramientas que se utilizan y se revisó la máquina internamente y se detectó la utilización de un fixture llamado PIN, el cual es insertado dentro del molde y las piezas para después iniciar el proceso de moldeo por inyección.



Figura 3 Fixtures “PIN” utilizado durante el proceso de moldeo de la pieza

Para analizar el fixture “PIN” se midió la altura de los orificios de la pieza 1-1532082-9 con el vernier Mitutoyo absolute. El resultado obtenido nos muestra que la altura de los orificios es de 0.1940 mm, después se mide el grosor de los pines que se utilizan durante el proceso, para de esta manera analizar si puede ser un factor crítico sobre las dimensiones del diámetro de los orificios del silicón. Se observó que a una altura de 0.1940 mm se detecta un grosor en el PIN de 0.1172 mm, por lo cual se considera como una causa potencial que puede afectar al proceso productivo en relación a las especificaciones de calidad del orificio 1 y 2.

Al considerar los PIN como un factor potencial, se propuso realizar unos pines que a una altura de 0.1940 mm muestre un grosor de 0.120 mm y posteriormente realizar un diseño de experimentos para verificar su implementación. El diseño que se utilizó para determinar si el grosor del PIN es un factor crítico en el diámetro de los orificios y se realizó un experimento con un solo factor donde se hace variar el “PIN” utilizado en el proceso. Se clasificaron los pines en Pin A y Pin B, donde el Pin A es el par que muestra un grosor de 0.1172 mm y e Pin B es el par que muestra un grosor de 0.120 mm

De acuerdo a los datos recolectados de cada muestra, se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis estadístico de los resultados del diseño de experimentos con un solo factor para el Orificio 1 y Orificio 2

Orificio 1			Orificio 2		
	Pin A	Pin B		Pin A	Pin B
Media	0.117	0.119	Media	0.119	0.121
StDev	0.001	0.001	StDev	0.000	0.000
Media Mínima	0.116	0.119	Media Mínima	0.118	0.120

18 Gloria Paola Ortiz Espinoza, Carlos Anaya Eredias, Gilberto Ortiz Suárez, Pedro David Sánchez Pérez

Media Máximo	0.118	0.120	Media Máximo	0.119	0.121
Valor Mínimo	0.115	0.118	Valor Mínimo	0.118	0.120
Valor Máximo	0.120	0.121	Valor Máximo	0.120	0.122

Prueba de Diferencia de Medias para Orificio 1 y Orificio 2

1. Se realiza una prueba de diferencia de medias para el Orificio y Orificio 2 antes y después de la modificación del Pin.

Ho: La medias antes y después son iguales
H1: La medias después del cambio es superior a la media antes del cambio

Tabla 4. Prueba de diferencia de medias para Orificio 1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Orificio_1	10	0.119440	0.000750	0.00024
Orificio	10	0.11725	0.00133	0.00042

Difference = mu (Orificio_1) - mu (Orificio)
Estimate for difference: 0.002190
95% CI for difference: (0.001175, 0.003205)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4.53 P-Value = 0.000 DF = 18
Both use Pooled StDev = 0.0011

Tabla 5. Prueba de diferencia de medias para Orificio 1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Orificio_2	10	0.120760	0.000488	0.00015
Orificio	10	0.118610	0.000412	0.00013

Difference = mu (Orificio_2) - mu (Orificio)
Estimate for difference: 0.002150
95% CI for difference: (0.001726, 0.002574)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 10.64 P-Value = 0.000 DF = 18
Both use Pooled StDev = 0.0005

Como se muestra en la Tabla 4 y 5 se rechaza la hipótesis nula, es decir, la media después del cambio se incrementó.

4.4 Implementación de Resultados

Para confirmar que los diámetros del Orificio 1 y 2 cumplen con las especificaciones de calidad, se tomaron 30 mediciones de un día de producción utilizando el par de Pin B de 0.120 mm de grosor. Los datos obtenidos se concentran estadísticamente en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis estadístico de los datos obtenidos para Orificio 1 y Orificio 2 con Pin B

Orificio 1		Orificio 2	
	Pin B		Pin B
Media	0.119	Media	0.120
StDev	0.0003	StDev	0.0003
Media Mínima	0.119	Media Mínima	0.120
Media Máximo	0.120	Media Máximo	0.121
Valor Mínimo	0.119	Valor Mínimo	0.12
Valor Máximo	0.120	Valor Máximo	0.121

Como se puede observar, la media de ambos orificios se encuentran dentro de especificación, así como el valor mínimo y máximo de cada uno, por lo tanto se concluye que el proceso se encuentra dentro de especificación.

5 Resultados

Al determinar que el Pin era un factor crítico que afecta en la variable de respuesta, se realizó una modificación en el diseño, es decir, a una altura de 0.194 mm el grosor tiene que ser 0.120 mm. Se puede resaltar que en el estado inicial del proceso las partes por millón totales de no conformidad eran de 611,111 piezas para el orificio 1 y 300,000 piezas para el orificio 2, las cuales se localizaban por debajo de la especificación inferior. Después de rediseñar el fixture, las partes por millón totales de no conformidad disminuyeron en su totalidad a 0 piezas fuera de especificación para ambos orificios. Además, el índice tanto de C_p como de C_{pk} mejoró en comparación de los resultados obtenidos anteriormente para cada orificio, es decir, la capacidad potencial incrementó de un $C_p = 0.91$ y $C_{pk} = -0.10$ a $C_p = 1.66$ y $C_{pk} = 1.17$ para el orificio 1 y de un $C_p = 0.1$ y $C_{pk} = 0.08$ a $C_p = 1.83$ y $C_{pk} = 1.51$ para el orificio 2.

6 Conclusiones

El diseño de experimentos es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores. Con esta técnica se puede conseguir entre otras, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir su variabilidad o los costos de producción.

Al realizar un diseño de experimentos en el proceso de moldeo por inyección de la pieza 1-1532082-9 se concluye que el factor principal que interviene en la calidad del producto es un par de fixture llamados "Pin". Después de rediseñar el fixture se obtuvieron mejores resultados en el proceso de producción teniendo 0 piezas fuera de especificación para ambos orificios. Al mejorar el proceso se obtiene un impacto positivo en la satisfacción del cliente, cumpliendo sus expectativas de manera más efectiva y

20 Gloria Paola Ortiz Espinoza, Carlos Anaya Eredias, Gilberto Ortiz Suárez, Pedro David Sánchez Pérez

eficiente, al embarcar un producto que cumple con las características de calidad, además, se eliminan los tiempos de retrabajo, y se minimizan los costos por factor de scrap o desperdicio.

Referencias

1. Camisión, C., and Pérez, D. J.(2010). The future of the quality/excellence function: A vision from the Spanish firm. Routledge, 649-672
2. Shuaib, N., Nasir, S., Fathullah, M., Shayfull, Z., & Abdul Manan, M. (2012). The Influence of Different Mold Temperature on Warpage in a Thin Shallow Injection Molding Process. *International Review of Mechanical Engineering*, 11-16
3. Kurt, K., Kaynak, A., & Girit, O. (2009) Experimental investigation of plastic injection molding: assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Master Des*, 3217-3224
4. Curic, D., Veljkovic, Z., & Duhovnik, J. (2012). Comparison of methodologies for identification of process parameters affecting geometric deviations in plastic injection molding of housing using Taguchi method. *Mechanika*, 671-676.
5. Saurav, D., Bandyopadhyay, A., & Kumar, P. (2008). Greybased Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead-on iplate. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 1136-114.
6. Ko-Ta, C., & Fu-Ping, C. (2006). Analysis of shrinkage and warpage in an injection-molded part with a thin shell feature using the response surface methodology. *Int J Adv Manuf Technol*, 468–479
7. Jeang, A. (1999). Robust Tolerance Desing by Response Surface Methodology. *Advance Manufacturing Technology*, 399-403
8. Antony, J., & Antony, J. Teaching the Taguchi method to industrial engineers. *Work Study*, 141-149 (2001).
9. Ming-Tsan, C., Yung-Kuang, Y., & Yun-Hsiang, H. Modeling and Optimization of Injection Molding Process Parameters for Thin-Shell Plastic Parts. *Polymer-Plastics Technology & Engineering*, 745-753 (2009).
10. Montgomery, D. (2005). *Diseño y Análisis de experimentos*. Limusa S.A de C.V.