



Artículo de investigación

# Método Taguchi para la optimización de parámetros en la simulación numérica del proceso de inyección de plástico

## *Taguchi method for parameter optimization in the numerical simulation stage for the injection molding process*

Elva Lilia Reynoso Jardón , Manuel Nandayapa Alfaro , Quirino Estrada Barbosa , Oscar Tenango Pirin , Yahir de Jesús Mariaca Beltrán , Jacinto Fraire Bernal , Carlos Sebastián González Miranda 

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. Plutarco Elías Calles #1210 Fovissste Chamizal Ciudad Juárez, Chihuahua, México. C.P. 32310

**Autor de correspondencia:** Elva Lilia Reynoso Jardón, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. Plutarco Elías Calles #1210 Fovissste Chamizal Ciudad Juárez, Chihuahua, México. C.P. 32310. E-mail: [elva.reynoso@uacj.mx](mailto:elva.reynoso@uacj.mx). ORCID: 0000-0002-0729-2822.

**Enviado:** 3 de Agosto del 2023

**Aceptado:** 13 de Octubre del 2023

**Publicado:** 24 de Octubre 2023

**Resumen.** - *El trabajo plantea el uso de Método Taguchi para la optimización de parámetros en la simulación numérica del proceso de inyección de plástico para reducir el desplazamiento total en el producto. Se identificaron las variables de temperatura de derretimiento, tiempo de enfriamiento, tiempo de llenado, y tiempo de mantención. Se plantea la utilización de diseño de experimentos de Taguchi de tres niveles y cinco factores, que suman un total de 27 iteraciones del experimento. El análisis de señal a ruido determinó que los dos parámetros más influyentes en la disminución de desplazamiento fueron temperatura de derretimiento y tiempo de mantención de presión. Tras el análisis de la varianza y la interpretación de gráficas de señal se plantearon dos experimentos cuyos valores demostraron una mejora de 27 % (5.0349 mm) y 31.43% (4.7485 mm), respectivamente, en comparación a los valores de control (6.9252 mm). Mediante el uso de las herramientas permite. Mediante el uso de Taguchi y SolidWorks plastic se logró disminuir la variación de la deformación y la detección de las principales variables que afectan en el proceso de llenado de la pieza aplicando el método propuesto.*

**Palabras clave:** Simulación numérica; Inyección de plásticos; Taguchi.

**Abstract.** – *This paper proposes the use Taguchi method for parameter optimization in the numerical simulation stage for the injection molding process to reduce the total displacement of the product. The variables of melting temperature, cooling time, filling time, and holding time were identified. The use of Taguchi's design of experiments of three levels and five factors is proposed, which adds up to a total of 27 iterations of the experiment. The signal-to-noise analysis determined that the two most influential parameters in the decrease of displacement were melting temperature and pressure maintenance time. After the analysis of the variance and the interpretation of signal graphs, two experiments were proposed whose values demonstrated an improvement of 27 % (5.0349 mm) and 31.43 % (4.7485 mm), respectively, compared to the control values (6.9252 mm). Using Taguchi and SolidWorks plastic, it was possible to reduce the variation of deformation and the detection of the main variables that affect the filling process of the part by applying the proposed method.*

**Keywords:** Numerical simulation; Plastic injection; Taguchi.



## 1. Introducción

Los moldes de inyección son una parte importante del proceso de fabricación de productos en la industria manufacturera de plástico, caucho, metales, entre otras [1]. Los moldes son herramientas especializadas que se utilizan para dar forma a una variedad de productos, desde piezas con dimensiones pequeñas hasta aquellas con mayor tamaño sobre todo cuidando características de diseño [2, 3]. Algunos productos son piezas de aviones, utensilios de cocina, juguetes, piezas de cómputo, entre otros. El proceso de inyección de plástico es eficiente y versátil, por lo tanto, se convierte en una opción para producir componentes con formas complejas en grandes volúmenes [4].

Hoy en día la demanda de bienes de consumo es bastante alta; donde, la mayor cantidad de estos bienes son hechos a base de plástico. Dentro de los métodos integrados a la producción en masa se encuentra la inyección de plásticos [5, 6]. En la cual, a través de la inyección de distintos tipos de plásticos en un molde permiten producir piezas de alta calidad a bajo costo. Sin embargo, al utilizar las condiciones incorrectas en el proceso de inyección de plástico, la pieza puede resultar de baja calidad representando una pérdida monetaria para la empresa. De acuerdo con [7], se encontró que si no se tienen cierto control en la velocidad y presiones podrían de llenado del molde ocasiona desequilibrio en el llenado del molde. Otros estudios como los de [8] y [9] demostraron que las propiedades mecánicas de los termoplásticos son también factores determinantes del proceso de moldeo, principalmente los parámetros de llenado.

Por otro lado, en [10] y [11] se determinaron que la fase de enfriamiento del proceso del moldeo por inyección es la más importante, debido que controla la calidad general de la pieza y la tasa de producción general del producto. Además, de

acuerdo con [11] y [12] se concluyó que el material del inserto del molde tiene un efecto significativo en el tiempo de enfriamiento de la pieza. Otro parámetro importante es el sistema de enfriamiento; de acuerdo con [13] y [14] de no tener un sistema adecuado de enfriamiento, la presencia de deformación de la pieza puede ser hasta de un 70%. La deformación es un tipo de distorsión característico en los procesos de inyección de plásticos en el que la pieza pierde paralelismo y comienza a deformarse similar al pandeo. Las variables de inyección y de diseño juegan un papel importante que definirán la producción de *scrap* [15, 16].

En la simulación numérica del proceso de inyección de plásticos, los procesos de llenado, embalaje, enfriamiento, deformación, orientación de la fibra, tensión estructural y contracción de material son incluidos, permitiendo identificar puntos de falla o deformación, áreas de mejora en diseño, parámetros para el mismo proceso [17].

Por otra parte, el método Taguchi es una alternativa a la resolución de problemas enfocada al mejoramiento de calidad y mejora de productos en general. El enfoque principal del método es la reducción de ruido en los procesos productivos. El método es utilizado en diversos campos de la ingeniería y sector manufacturero que va más allá de la filosofía de la empresa y se enfoca en el proceso productivo [18, 19]. Por ejemplo, en [20] el estudio presenta el uso del método del Taguchi para optimizar la fabricación aditiva en filamentos fundidos para aumentar la resistencia a la flexión. Para el estudio consideraron diferentes parámetros para determinar la configuración óptima; donde, utilizaron los resultados encontrados mediante el análisis de varianza (ANOVA).



## 2. Materiales y métodos

Para la obtención de los parámetros ideales en un proceso de inyección de plásticos aplicado a una cesta de material de polipropileno (PP) se plantea el diseño de experimentos de Taguchi, donde la variable a controlar será la distorsión del producto (dada en mm). Se deberá dibujar una pieza en 3D de una cesta en un software CAD. La

obtención de resultados se dará por medio de SolidWorks Plastics [21, 22]. Para validar los resultados se plantea un análisis de Taguchi apoyado en el software estadístico Minitab. El proceso de desarrollo se llevará a cabo en base al siguiente método propuesto, véase en la Figura 1. El método propuesto consiste en 6 pasos, generando un resultado óptimo de una forma simple de solución.

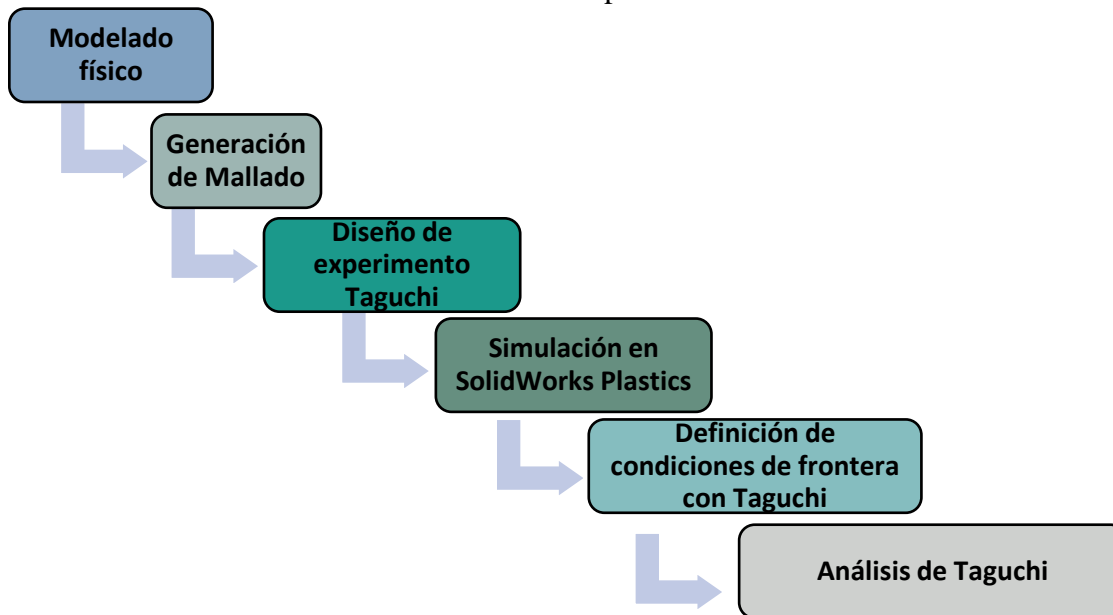


Figura 1. Diagrama de pasos del método propuesto.

### 2.1 Modelado físico

Para simular numéricamente un proceso de inyección y obtener los parámetros óptimos del mismo es necesario desarrollar un molde para el

proceso de inyección. Además, en el proceso es necesario contar con un modelo en 3D el cual consiste en una cesta pequeña con las siguientes dimensiones 200 mm x 150 mm x 80mm.

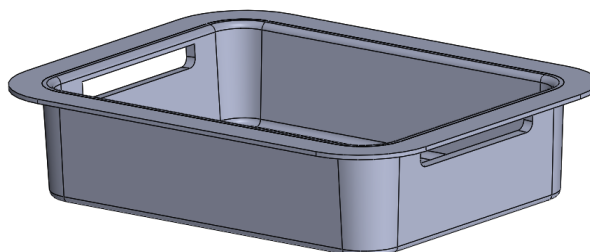


Figura 2. Cesta

### 2.2 Generación de Mallado

Para determinar la malla se evalúan distintos

tamaños de malla. Se ejecutaron varias simulaciones numéricas con parámetros estándar de SolidWorks Plastics como *filling time*, *melt*



*temperature, mold temperature, injection pressure limit, etc.* donde la única variable independiente fue el tamaño de malla considerando el *Total Stress Displacement* como la variable controlable [23]. Para el análisis de malla se consideraron diferentes tamaños de malla con valores de 48780, 71420, 108499, 194030, 284359 y 442305 elementos; la variación de la deformación fue de entre 5.9227 mm hasta 7.7121 mm. Tras considerar el tiempo de cómputo contra la variación en los resultados se decidió utilizar el tamaño de malla 194030 elementos y 83385 nodos, considerando para esta malla un total de desplazamiento de 6.9252 mm.

### 2.3 Diseño de experimento Taguchi

Diseñar un experimento Taguchi consta de 4 pasos:

- Identificar las variables dependientes de las independientes. Las segundas son definidas como aquellas que provocaran una respuesta en las variables dependientes.
- Definir los niveles para las variables independientes. Los niveles son todos los valores tomados en cuenta a la hora de realizar el experimento.
- Establecer el arreglo ortogonal de experimentos. El método considera una cantidad de variación con base en el número de variables independientes, por el número de niveles, elevar el número de experimentos genera un rango mayor de puntos en el análisis de varianza.
- Llevar a cabo los experimentos que contempla el DOE Taguchi que se ha definido para posteriormente analizarlo por medios externos. Para este caso se utilizará un análisis de varianza. Llevar a cabo los experimentos que contempla DOE Taguchi para posteriormente analizarlo por medios externos. Para este caso se utilizará un análisis de varianza [24].

### 2.4. Simulación en SolidWorks Plastics

El primer paso para simular de forma numérica dentro de SolidWorks Plastics es la selección del tipo de análisis a realizar sobre la pieza. Se ofrecen dos opciones: análisis de *shell* y *solid* (el caso de estudio fue determinado con análisis *solid*). El análisis de *shell* está diseñado para modelos con partes delgadas de espesor uniforme. Por otra parte, el análisis de tipo *solid*, está diseñado para analizar partes gruesas con geometrías complejas o detalladas, no obstante, se requiere mayor capacidad de cómputo para ejecutarse. Se debe seleccionar el tipo de plástico a utilizar en la simulación para el estudio se consideró material de polipropileno. Los parámetros de la simulación numérica definirían la forma en la que el polímero fluiría a través del molde (*filling time, melt temperature, mold temperature, injection pressure limit*). Los parámetros de empaque tienen como objetivo la distribución uniforme de peso e integridad dimensional del polímero en el molde de inyección (*pure holding time y pure cooling time*).

### 2.5 Definición de condiciones de frontera con Taguchi

Primero se debe definir el punto de inyección, ya sea por el usuario con base en el conocimiento previo o puede ser sugerido por medio del software SolidWorks plastics. Otras consideraciones son la declaración de las entradas y salidas del flujo refrigerante como el agua y la declaración de del molde virtual como acero P20. Una vez determinados los parámetros se puede ejecutar un análisis de llenado, empaqué, deformación y enfriamiento que entregará los resultados que busca el experimento Taguchi.

### 2.6 Análisis de Taguchi

#### 2.6.1 Tipo de diseño para crear diseño de Taguchi



En los diseños de Taguchi se utilizaron arreglos ortogonales, los cuales estiman los efectos de los factores de respuesta y la variación. Un arreglo ortogonal significa que el diseño está balanceado, de manera que los niveles de los factores se ponderan equitativamente. El tipo de diseño que se seleccionó fue de 3 niveles, considerando 5 factores. Es decir, se tendrían un diseño L27 tiene 27 corridas y  $(3^5)$  esto significa 5 factores en 3 niveles [25, 26].

### 2.6.2. Métodos de diseño de Taguchi

En la metodología de Taguchi utiliza una función de pérdida  $L$  cuadrática. La pérdida esperada para la característica aleatoria  $X$  de la calidad con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$  como se muestra en la ecuación 1.

$$E[L] = kE[X - T]^2 = k[\sigma^2 + (\mu - T)^2] \quad (1)$$

Según este modelo, las pérdidas son causadas por la variabilidad y el sesgo en las características estudiadas. Por tanto, para reducir las pérdidas se debe actuar sobre la variabilidad del proceso y las desviaciones del valor medio de la característica de calidad en estudio respecto al valor nominal.

Sin embargo, cuando se introduce la función de pérdida como en la ecuación 1 se hace presente la necesidad de combinar el estudio de la respuesta media con la variabilidad, es decir, definir una medida que tome ambos aspectos. Esta medida es referida por Taguchi como razón señal-ruido (S/N). Esta terminología proviene del lenguaje utilizado en ingeniería, donde la media de la variable respuesta representa la señal y la variación  $\sigma^2$  del ruido. Se pueden definir diferentes medidas de razón S/N, dependiendo del objetivo del estudio. Las más frecuentes son [27] y [28]:

(1) *Nominal es mejor*. La pérdida se incrementa según la característica  $X$  de la

calidad estudiada se aleja del valor nominal.

(2) *Más pequeño es mejor*. El valor nominal es cero y la característica de la calidad es no negativa. La pérdida disminuye según la característica de la calidad se aproxima a cero.

(3) *Más grande es mejor*. El valor nominal es infinito y la característica de la calidad es no negativa. La pérdida disminuye cuando la característica de la calidad crece.

Para el caso de estudio se busca encontrar aquellos parámetros que expresen un menor porcentaje de alabeo, por lo que el análisis se basará en la aproximación de valor más pequeño es mejor [29, 30].

Por lo que el modelo utilizado más pequeño es mejor, se muestra en las siguientes ecuaciones

$$EL = EX^2 \quad (2)$$

donde,  $X$  es la característica de la calidad estudiada y por lo tanto se utiliza a aproximación como se muestra en la ecuación 3.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \quad (3)$$

Para la definición de la razón señal ruido (S/N) se calcula para cada combinación de niveles de factores, la fórmula para la relación S/N más pequeño es mejor, utiliza logaritmo base 10 está dada por la ecuación 4 [31].

$$SN = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (4)$$



donde,  $Y$  = respuestas para la combinación de niveles de factores dada y  $n$  = número de respuestas en la combinación de niveles de factores,  $i$  es el número del experimento [32].

El análisis de varianza (ANOVA) se utilizó para determinar qué factores y niveles tienen un impacto significativo en la variabilidad y la calidad del diseño de la cesta. Esto ayudó a identificar los factores más importantes para optimizar la disminución de la deformación de la pieza. Los pasos de cálculo utilizados en ANOVA son los siguientes:

La suma total de cuadrados (SCT), que mide la variación total en las respuestas como se muestra en la ecuación (5) [33].

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (5)$$

donde,  $Y_i$  es la respuesta en la  $i$ -ésima corrida del experimento y  $N$  es el número de casos en la matriz ortogonal, ecuación (6).

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (6)$$

La suma total de las desviaciones al cuadrado.  $SS_T$  consiste en la suma del error al cuadrado  $SS_e$  y la suma de las desviaciones al cuadrado  $SS_p$  debido a cada parámetro del proceso, por lo tanto  $SS_p$  se definió en la ecuación (7):

$$SS_p = \sum_{j=1}^n \frac{(SY_j)^2}{t} - \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N Y_i \right]^2 \quad (7)$$

donde,  $P$  es uno de los parámetros,  $j$  es el número de nivel de este parámetro  $P$ ,  $t$  es la repetición de cada nivel del parámetro  $P$ ,  $SY_j$  la suma de los resultados experimentales que involucran este parámetro  $P$  y el nivel  $j$ . La suma de cuadrados de los parámetros de error.  $SS_e$  es:

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_E \quad (8)$$

El grado total de libertad es  $D_T = N - 1$ , y el grado de libertad de cada parámetro probado es  $D_p = N - 1$ . La varianza del parámetro probado es  $V_p = \frac{SS_p}{D_p}$ . Entonces, el valor  $F$  para cada parámetro de diseño es simplemente la relación entre la media de las desviaciones cuadráticas y la media del error cuadrático  $F_p = \frac{V_p}{V_e}$ . La contribución porcentual  $\rho$  se calculó como [33]:

$$\rho P = \frac{SS_p}{SS_T} \quad (9)$$

El ANOVA utiliza estos cálculos estadísticos para determinar si los factores y niveles tienen un efecto significativo en la variable de salida, lo que ayuda en la optimización y mejora de procesos y productos.

### 3. Resultados

Para encontrar los parámetros ideales de inyección de plásticos se optó por un diseño de experimentos Taguchi de nivel 3. Cada nivel propone un valor diferente para una variable independiente. Las variables consideradas fueron tomadas de la literatura de diferentes trabajos [34, 35]. Se consideran como variables independientes las siguientes:

- Tiempo de llenado (*filling time* en inglés).
- Temperatura de derretimiento (*melt temperature* en inglés).
- Tiempo de enfriamiento (*pure cooling time* en inglés).
- Tiempo de manutención de presión (*pressure holding time* en inglés).
- Temperatura de molde (*mold temperature* en inglés).

La variable por controlar es la deformación total (*total displacement* en inglés) expresado en milímetros, dicho parámetro es lo que



previamente se definió como alabeo (deformación).

Los niveles de las variables independientes fueron asignados como se puede apreciar en la Tabla 1.

El diseño de experimentos Taguchi sugiere que se lleven a cabo tres iteraciones de cada experimento para eliminar errores. No obstante, los cambios entre una iteración a otra son mínimos para ser considerados relevantes.

### 3.1 Simulación numérica

Para modificar los parámetros de inyección de los experimentos es necesario tener en cuenta el arreglo ortogonal que generó el diseño de Taguchi. Para correr las 27 simulaciones fue necesario considerar los parámetros de inyección en *melt temperature*, *mold temperature*, *filling time*, *pressure holding time* y *pure cooling time*.

El punto de inyección definido fue elegido con base en ejemplos de cestas similares [35], el cual se encuentra en el centro de la base interior.

**Tabla 1.** Tabla de diseño Taguchi.

Número de experimento	<i>Melt Temperature</i> (°C)	<i>Mold Temperature</i> (°C)	<i>Filling Time</i> (s)	<i>Pure Cooling Time</i> (s)	<i>Pressure Holding Time</i> (s)
1	210	50	5	80	10
2	210	50	5	80	15
3	210	50	5	80	20
4	210	70	10	90	10
5	210	70	10	90	15
6	210	70	10	90	20
7	210	90	15	110	10
8	210	90	15	110	15
9	210	90	15	110	20
10	220	50	10	110	10
11	220	50	10	110	15
12	220	50	10	110	20
13	220	70	15	80	10
14	220	70	15	80	15
15	220	70	15	80	20
16	220	90	5	90	10
17	220	90	5	90	15
18	220	90	5	90	20
19	230	50	15	90	10
20	230	50	15	90	15
21	230	50	15	90	20
22	230	70	5	110	10
23	230	70	5	110	15
24	230	70	5	110	20
25	230	90	10	80	10
26	230	90	10	80	15
27	230	90	10	80	20



### 3.2 Resultados de la deformación

La Tabla 2, muestra la recolección de los resultados de *Total Stress Displacement* basado en el diseño Taguchi, dicha combinación de datos se aprecian de la columna 2 a la 6.

**Tabla 2.** Resultados totales de la deformación.

<i>Simulación</i>	<i>Melt Temperature (°C)</i>	<i>Mold Temperature (°C)</i>	<i>Filling Time (s)</i>	<i>Pure Cooling Time (s)</i>	<i>Pressure Holding Time (s)</i>	<i>Total, Displacement (mm)</i>
1	210	50	5	80	10	5.1871
2	210	50	5	80	15	5.0498
3	210	50	5	80	20	5.0713
4	210	70	10	90	10	5.2429
5	210	70	10	90	15	5.0297
6	210	70	10	90	20	5.04
7	210	90	15	110	10	5.3445
8	210	90	15	110	15	5.1385
9	210	90	15	110	20	5.0027
10	220	50	10	110	10	5.3541
11	220	50	10	110	15	5.387
12	220	50	10	110	20	5.3986
13	220	70	15	80	10	5.394
14	220	70	15	80	15	5.3185
15	220	70	15	80	20	5.3184
16	220	90	5	90	10	5.8254
17	220	90	5	90	15	5.5726
18	220	90	5	90	20	5.3382
19	230	50	15	90	10	5.6693
20	230	50	15	90	15	5.6772
21	230	50	15	90	20	5.7608
22	230	70	5	110	10	5.9205
23	230	70	5	110	15	5.6258
24	230	70	5	110	20	5.6473
25	230	90	10	80	10	5.9653
26	230	90	10	80	15	5.714
27	230	90	10	80	20	5.563

### 3.3 Análisis de varianza

Una vez se obtuvieron los resultados del análisis DOE, se sometió a un análisis de varianza por

medio del software Minitab. El análisis de varianza de relaciones señal a ruido demostró que las variables *Melt Temperature* y *Pressure Holding Time* son estadísticamente





significativos, es decir, son los que menos afectan en el proceso de llenado. La variable *Mold Temperature* cuenta con un valor de 0.082 arriba de lo necesario para ser considerado como

estadísticamente como significativo, considerando los menos significativos 0.002 para *Pressure Holding Time* y *melt Temperature* con valor de 0 [36].

**Tabla 3.** Análisis de Varianza de Relaciones SN

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Melt Temp. (°C)	2	4.22087	4.22087	2.11044	80.38	0.000
Mold Temp. (°C)	2	0.15378	0.15378	0.07689	2.93	<u>0.082</u>
Filling time (s)	2	0.05991	0.05991	0.02996	1.14	0.344
Pure Cooling Time (s)	2	0.04684	0.04684	0.02342	0.89	0.429
Pressure Holding Time(s)	2	0.48236	0.48236	0.24118	9.19	0.002
Error residual	16	0.42008	0.42008	0.02626		
Total	26	5.38386				

Debido a que la variable dependiente es del “tipo más pequeño es mejor”, se obtuvo una tabla de respuesta de relación de señal a ruido considerando este factor. Esta puede ser definida como una medida de utilizada para identificar los

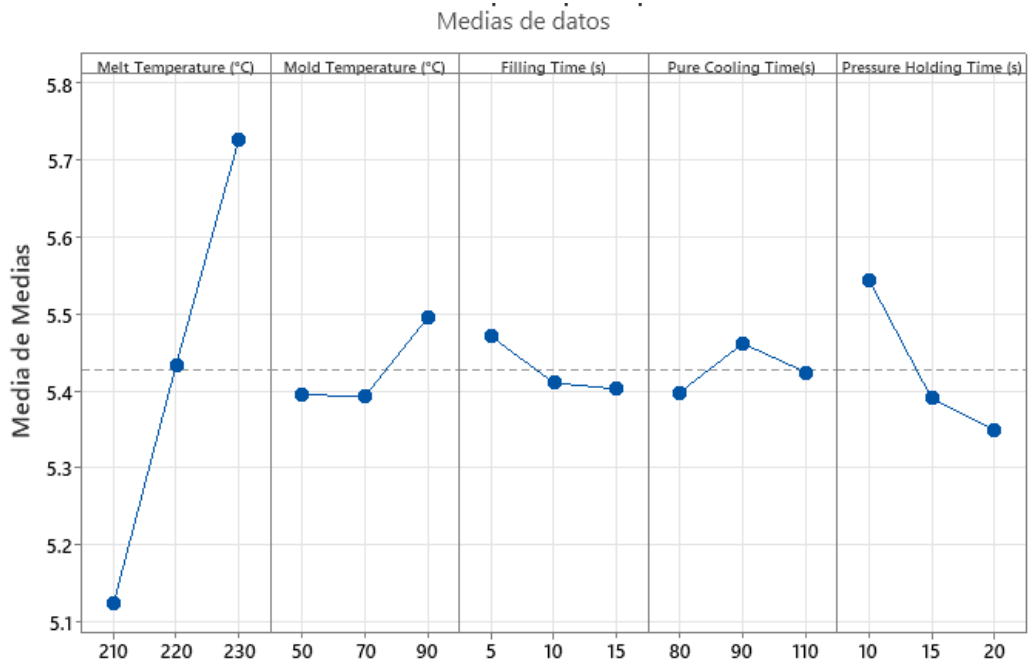
parámetros de control que reducen la variabilidad del proceso al minimizar los efectos de los factores que no se pueden controlar (factores de ruido) como se observa en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Respuesta para relaciones de señal a ruido, más pequeño es mejor.

Nivel	Melt Temp. (°C)	Mold Temp. (°C)	Filling time (s)	Pure Cooling Time (s)	Pressure Holding Time (s)
1	-14.19	-14.63	-14.75	-14.63	-14.87
2	-14.70	-14.63	-14.65	-14.73	-14.62
3	-15.16	-14.79	-14.64	-14.68	-14.56
Delta	0.97	0.16	0.10	0.10	0.31
Clasificar	1	3	4	5	2

En la Figura 3 se clasificó con números del 1 al 5, los factores que más tuvieron peso sobre la variable dependiente. De modo que, si se quisiera

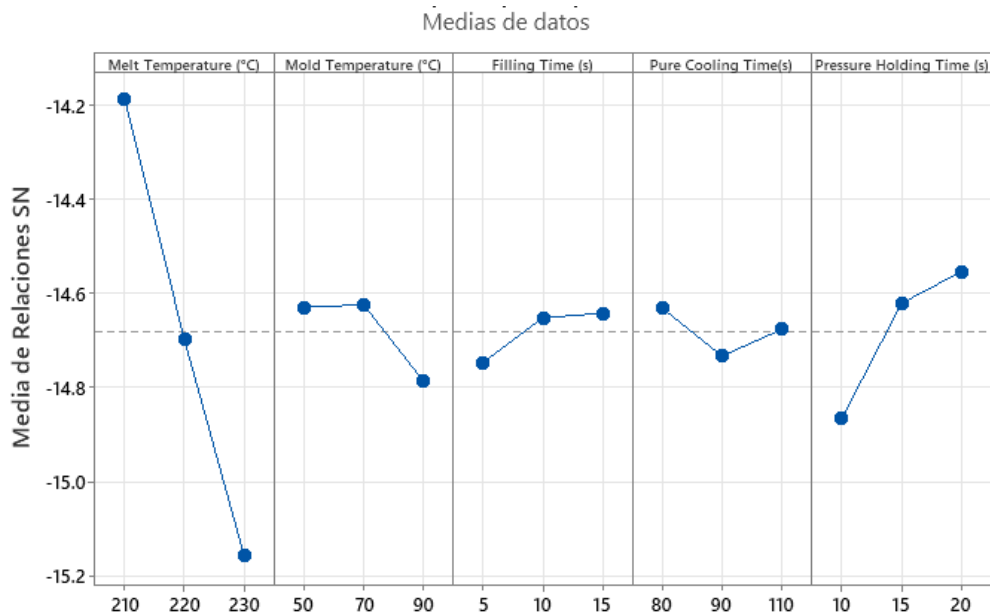
obtener mejores resultados, la variable *Melt Temperature* sería la primera a considerar cambiar.



**Figura 3.** Gráfica de efectos principales para medidas con respecto a la deformación en la cesta

En la Figura 4 se puede observar de manera gráfica las variables independientes que aportan los mejores resultados para las variables de *Melt Temperature*, *Mold Temperature*, *Filling Time*,

*Pressure Holding Time* y *Pure Cooling Time*. Aquellos valores cuya señal a ruido es mayor proveerán los valores con los cuales disminuirá la deformación en la cesta.



Señal a ruido: Más pequeño es mejor

**Figura 4.** Gráfica de efectos principales para relaciones SN con respecto a la deformación en la cesta



Los resultados mostrados en la Figura 5 son de una simulación de llenado donde no se controlaron las variables de *Melt Temperature*, *Mold Temperature*, *Filling Time*, *Pressure Holding Time* y *Pure Cooling Time*. La simulación de llenado presenta valores de

deformación mínima de 1.2742 mm identificados con color azul en la base de la cesta y valores máximos de 6.9262 mm identificados por el color rojo ubicados en las zonas masa alejadas del punto de inyección.

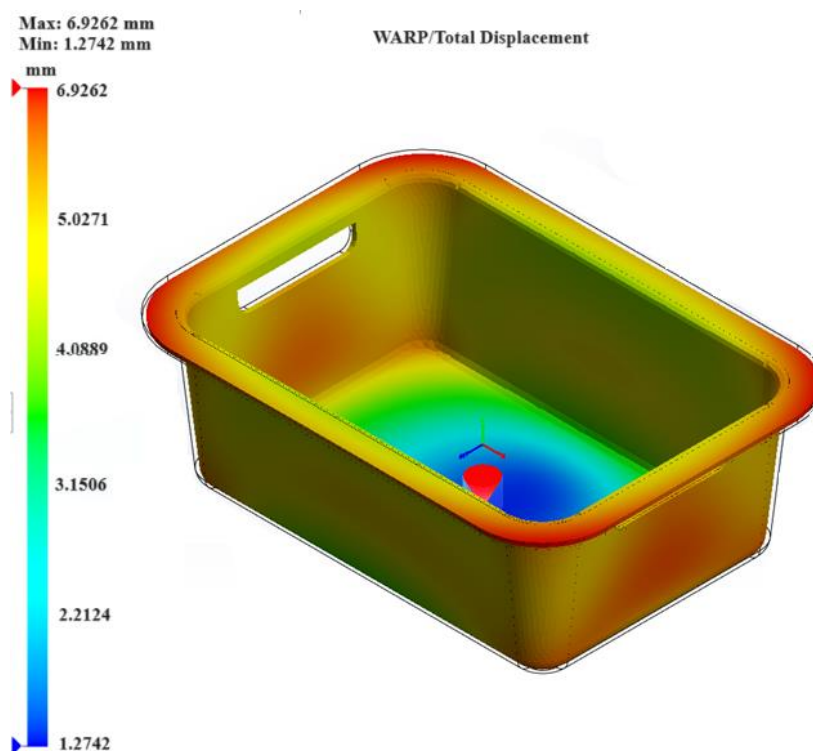


Figura 5. Análisis numérico de llenado sin control de las variables

### 3.4 Parámetros óptimos

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza expuestos en la Figura 5 los parámetros óptimos del sistema son:

Tabla 6. Parámetros óptimos para el llenado del molde

Parámetro	Valor
<i>Melt Temperature:</i>	210 °C
<i>Mold Temperature:</i>	70 °C
<i>Filling Time:</i>	15 s
<i>Pure Cooling Time:</i>	80 s
<i>Pressure Holding Time:</i>	20 s



En la Figura 6 se puede observar los resultados de los parámetros óptimos en proceso de llenado de inyección. Cuyo valor de deformación máximo es de 5.0349 mm. En comparación contra el caso no optimizado del proceso de inyección o sin control de las variables.

Calculando el valor de error relativo porcentual entre el valor máximo de deformación con los datos obtenidos en la simulación sin optimización contra la simulación con las variables controladas se obtuvo una diferencia a favor de 27% cumpliendo el objetivo de disminuir la deformación.

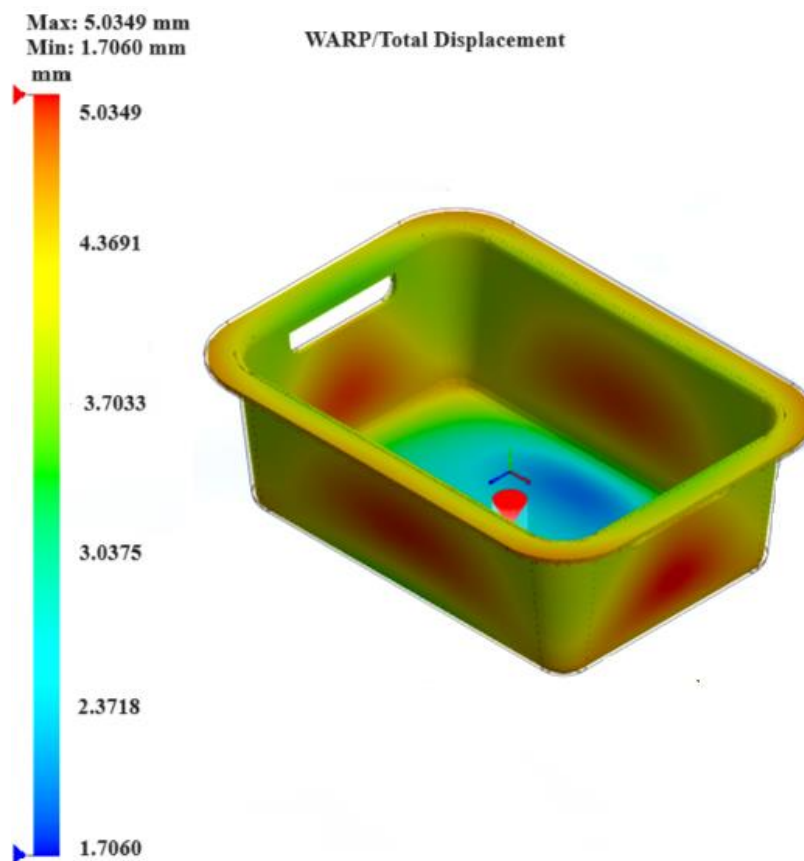


Figura 6. Simulación con parámetros ideales.

### 3.5 Caso predicción

Basado en los resultados mostrados en la Figura 4 y la Tabla 4 en donde la variable *melt temperatura* podría considerarse cambiar el valor para una segunda simulación de llenado con valores optimizados.

Tabla 6. Parámetros óptimos para el llenado del molde para el caso de predicción

Parámetro	Valor
<i>Melt temperature:</i>	230 °C
<i>Mold temperature:</i>	70 °C
<i>Filling time:</i>	15 s
<i>Pure cooling time:</i>	80 s
<i>Pressure holding:</i>	20 s



Como se puede observar en la Figura 7 el valor máximo del alabeo presente en la cesta es de 4.7485 mm. Lo cual representa una diferencia del

31.43% con base en el caso de los parámetros no optimizados (6.9252 mm).

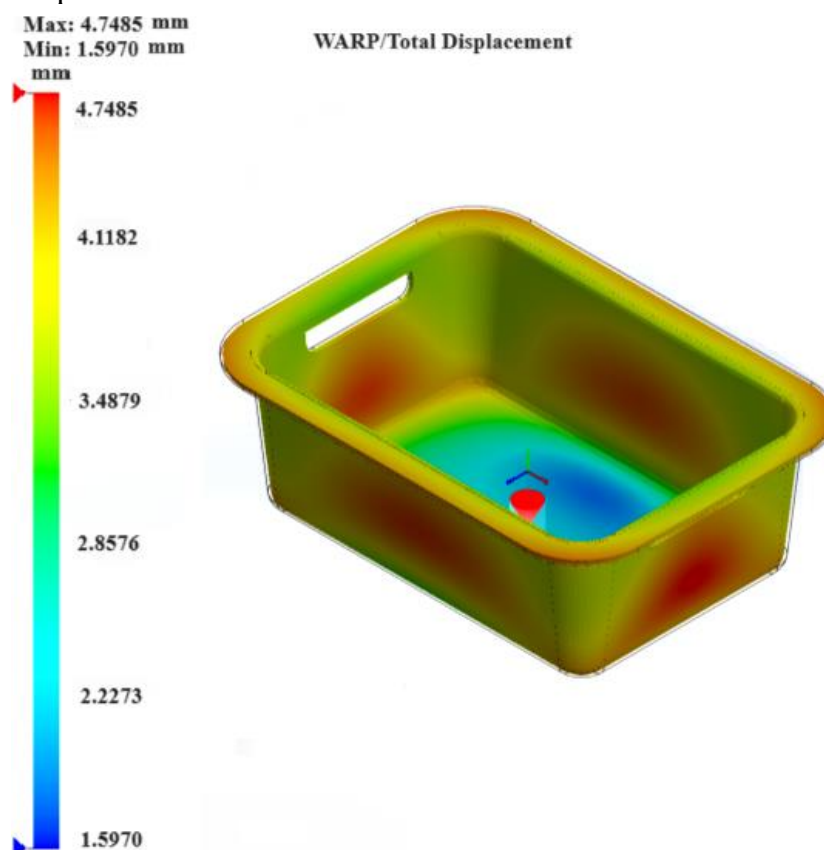


Figura 7. Caso con valores de predicción basados en ANOVA.

#### 4. Conclusiones

En este artículo se llevó a cabo la aplicación del método Taguchi para la optimización de parámetros en la simulación numérica del proceso de inyección de plástico. Los resultados se obtuvieron mediante el uso de diseño de experimentos Taguchi y análisis de resultados de señal a ruido. Los parámetros recolectados denotan una mejora del 27% en relación con la presencia de desplazamiento en el producto y una mejora de 31% en el caso predictivo basado en la interpretación de la gráfica de análisis de varianza señal a ruido.

Cabe resaltar que cada modelo puede presentar una tendencia diferente debido a su geometría, número de puntos de inyección o condiciones

externas a las variables independientes previamente establecidas. Resaltando la versatilidad del diseño de experimentos Taguchi al permitir el análisis de distintos tipos de entrada (modelo 3D).

Por mediante del uso de Taguchi y SolidWorks Plastic se logró disminuir la variación de la deformación y la detección de las principales variables que afectan en el proceso de llenado de la pieza aplicando el método propuesto.

#### 5. Agradecimiento de autoría

*Elva Lilia Reynoso Jardón:* Conceptualización;  
*Manuel Nandayapa Alfaro:* Metodología;  
*Quirino Estrada Barbosa:* Investigación;  
 Análisis de datos; *Oscar Tenango Pirin:*



Borrador original. *Yahir de Jesús Mariaca Beltrán*: revisión y edición. *Jacinto Fraire Bernal*: Revisión y edición; *Carlos Sebastián González Miranda*: Administración de proyecto.

### Referencias

- [1] P. Srikhumsuk, S. Butdee, C. Nitnara,” Study on injection molding parameters on PET with bio-plastic material and hot runner mold,” *Materials Today: Proceedings*, 2023. [doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.168](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.168)
- [2] S. Kitayama, K. Tamada, M. Takano, S.Aiba, “Numerical optimization of process parameters in plastic injection molding for minimizing weldlines and clamping force using conformal cooling channel,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 32, 2018. [doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.04.007](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.04.007)
- [3] N.A.Wahab, I.N. Ahmad, M. A. Omar, R. Sauti, J. Saedon, “Determination of optimised solvent debinding parameters of injection moulded 316L stainless steel using Taguchi approach,” *Materials Today: Proceedings*, vol.16, no. 4, pp. 2357-2366,2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.139>
- [4] L. Flórez, “Problemas en piezas moldeadas por inyección,” 2021. [Online]. Available: <https://www.plastico.com/es/noticias/como-solucionar-problemas-en-piezas-moldeadas-por-inyeccion.png>
- [5] B. Ravikiran, D. K. Pradhan, S. Jeetb, D. K. Bagal, A. Baruab, S. Nayak,” Optimización paramétrica del moldeo por inyección de plástico para el moldeo de polímeros FMCG (PMMA) utilizando el algoritmo de optimización híbrido Taguchi-WASPAS-Ant Lion” *materialstoday: proceedings*, vol.56, no.5,pp.2411-2420,2022. [doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.204](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.204)
- [6] G. Singh, M. k. Pradhan, A. Verma “Optimización de respuesta múltiple de los parámetros del proceso de moldeo por inyección para reducir el tiempo de ciclo y la deformación,” *materialstoday, proceedings*, vol.5,no.2,pp.8398-8405,2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.534>
- [7] A. H. Ridho, C. Feng-Jung, H. Sheng-Jye, “Microstructure development analysis of long-glass-fiber-reinforced polypropylene in injection molded spiral-flow,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 163, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107261>
- [8] D.G. Seong, C. Kang, S.Y. Pak, C.H. Kim, Y . S. Song, “Influence of fiber length and its distribution in three phase poly (propylene) composites”, *Composites Part B: Engineering*, vol. 168, pp. 218-225, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.086>
- [9] W. Kuan-Hsun, C. Ya-Tung, H. Sheng-Jye, H. Chao-Tsai, P. Hsin-Shu, ”Influence of back pressure and geometry on microstructure of injection-molded long-glass-fiber-reinforced polypropylene ribbed plates,” *Polymer Testing*, vol. 116, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2022.107797>
- [10] A. Pyata, M. Nikzad, S.S.Vishnubhotla, J.Stehle, E. Gad, ”A simulation-based approach for assessment of injection moulded part quality made of recycled olefins,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, no. 1,pp. 311-319,2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.169>
- [11] K. P. Reddy, B.Panitapu, “High thermal conductivity mould insert materials for cooling time reduction in thermoplastic injection moulds,” in *5th International Conference of Materials Processing and Characterization*, vol.4,no.2,pp.519-526,2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.052>



[12] M. Khan, S. K. Afaq, N. U. Khan, S. Ahmad, “Cycle Time Reduction in Injection Molding Process by Selection of Robust Cooling Channel Design,” *ISRN Mechanical Engineering*, pp.1-8,2014. <https://doi.org/10.1155/2014/968484>

[13] R. Sanchez, J. Aisa, A. Martinez, D. Mercado, “On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding,” *Measurement*, vol.45, no.5, pp.1051-1056,2012. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.039>

[14] A.B.D. Shayfull Zamree, S.S. Rahim, A. M. Zain, S.M. Zain, R. Mohd Nasir, Saad, “Improving the Quality and Productivity of Molded Parts with a New Design of Conformal Cooling Channels for the Injection Molding Process,” *Adv. Polym. Tech.*, vol.35, no. 1,pp. 21524,2015. [DOI:10.1002/adv.21524](https://doi.org/10.1002/adv.21524)

[15] Z.X. Chen, Z.H. Wan, and C. Guo, “Comprehensive simulation analysis of plastic injection process,” in *2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops*. IEEE, Nov. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/iitaw.2009.80>

[16] A. Z. Gómez and W. A. S. Castro, “Mejoramiento de la calidad del café soluble utilizando el método Taguchi,” vol. 22, no. 1, pp. 116–124, Jan. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4067/s0718-33052014000100011>

[17] W. Kuang and Z. Xue, “Injection process analysis and mold manufacturing for telephone cover,” in *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, vol. 2, 2009, pp. 80–83. [DOI: 10.1109/ICMTMA.2009.35](https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2009.35)

[18] A. Hatim, K. Zohaib, A. U. Y. Syed, H. Syed Rashi, R. Dinesh, Z. S. Muhammad,” Polyetherketoneketone (PEKK): An emerging biomaterial for oral implants and dental prostheses,” *Journal of Advanced Research*, vol. 28, pp. 87-95, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.09.004>

[19] A.Rabinowitz, P. M. DeSantis, C. Basgul, H. Spece, S.M. Kurtz,”Taguchi optimization of 3D printed short carbon fiber polyetherketoneketone (CFR PEKK),”*Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 145, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105981>

[20] J. J. Páramo, J. F. R. Arredondo, H. P. Mora, and E. A. Gómez, “Análisis de un proceso de inyección de plástico por interacción fluido estructural y cambio de estado,” *Acta Universitaria*, vol. 29, pp. 1–18, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15174/au.2019.2150>

[21] H. Gu, J. Sun, J. Jiang, Y. Xu, B. Li, and J. Zhang, “Research on intelligent control of thin-walled plastic parts forming quality based on CAE and DOE technology,” in *2020 11th International Conference on Prognostics and System Health Management (PHM-2020 Jinan)*. IEEE, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/phm-jinan48558.2020.00102>

[22] F.T. Weng, Tsochu-Lin, and Y.-Y. Lu, “Parameter analysis of lift component in injection molding,” in *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, 2018, pp. 754–757. [DOI: 10.1109/ICASI.2018.8394369](https://doi.org/10.1109/ICASI.2018.8394369)

[23] J. Xamán., *Dinámica De Fluidos Computacional Para Ingenieros*, 1st ed. Palibrio, 2016. <https://es.scribd.com/book/524148143/Dinamica-De-Fluidos-Computacional-Para-Ingenieros>



[24] W. C. Chen, H. C. Tsai, and T. T. Lai, "Optimization of mimo plastic injection molding using doe, bpn, and ga," in 2010 IEEE 17Th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2010, pp. 676–680.

DOI: [10.1109/ICIEEM.2010.5646527](https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2010.5646527)

[25] J. Antony, "Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner", *Sensor Review*, vol. 26, no. 3, pp. 227-230,2006.

<https://doi.org/10.1108/02602280610675519>

[26] Soporte de Minitab 21," Especificar el diseño para crear diseño de Taguchi", Copyright © 2023 Minitab, LLC. All rights Reserved,2023.

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/create-taguchi-design/create-the-design/specify-the-design/?SID=63302>

[27] Soporte de Minitab 21" Seleccionar las opciones para Analizar diseño de Taguchi (estático)", Copyright © 2023 Minitab, LLC. All rights Reserved,2023.

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/perform-the-analysis/select-the-options-static-design/?SID=63406>

[28] D.C.Montgomery, "Design and analysis of experiments". John wiley & sons,2017.

[https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Py7bDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Montgomery,+D.+C.+\(2017\).+%22Design+and+Analysis+of+Experiments.%22+John+Wiley+%26+Sons.&ots=X7y3k6SV26&sig=nzJC7MhGd\\_6KTXKubDCyiOm00hM#v=onepage&q=Montgomery%2C%20D.%20C.%20\(2017\).%20%22Design%20and%20Analysis%20of%20Exp](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Py7bDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Montgomery,+D.+C.+(2017).+%22Design+and+Analysis+of+Experiments.%22+John+Wiley+%26+Sons.&ots=X7y3k6SV26&sig=nzJC7MhGd_6KTXKubDCyiOm00hM#v=onepage&q=Montgomery%2C%20D.%20C.%20(2017).%20%22Design%20and%20Analysis%20of%20Exp)

[eriments.%22%20John%20Wiley%20%26%20Sons.&f=false](https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/methods-and-formulas/methods-and-formulas/#:~:text=M%C3%A1s%20peque%C3%B1o%20es%20mejor,-La%20relaci%C3%B3n%20de&text=2)%2F)-,donde%20Y%20%3D%20respuestas%20para%20la%20combinaci%C3%B3n%20de%20niveles%20de%20factores,combinaci%C3%B3n%20de%20niveles%20de%20factores)

[29] Soporte de Minitab 21, "Métodos y fórmulas para Analizar diseño de Taguchi", Copyright © 2023 Minitab, LLC. All rights Reserved,2023.

[https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/methods-and-formulas/methods-and-formulas/#:~:text=M%C3%A1s%20peque%C3%B1o%20es%20mejor,-La%20relaci%C3%B3n%20de&text=2\)%2F\)-,donde%20Y%20%3D%20respuestas%20para%20la%20combinaci%C3%B3n%20de%20niveles%20de%20factores,combinaci%C3%B3n%20de%20niveles%20de%20factores](https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/methods-and-formulas/methods-and-formulas/#:~:text=M%C3%A1s%20peque%C3%B1o%20es%20mejor,-La%20relaci%C3%B3n%20de&text=2)%2F)-,donde%20Y%20%3D%20respuestas%20para%20la%20combinaci%C3%B3n%20de%20niveles%20de%20factores,combinaci%C3%B3n%20de%20niveles%20de%20factores)

[30] N. Arslanoglu, A. Yigit "Investigación experimental del efecto de la radiación sobre el confort térmico humano mediante el método Taguchi," *Aplica. Termia. Ing.*, vol.92, pp. 18-23,2017. [10.1016/j.applthermaleng.2015.09.070](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.070)

[31] P.J. Ross," Técnicas Taguchi para la Ingeniería de Calidad", (segundo), McGraw Hill , Nueva York ,1996

[.https://trid.trb.org/view/1182944](https://trid.trb.org/view/1182944)

[32] A.H. Bademlioglu, A.S. Canbolat , N. Yamankaradeniz , O. Kaynakli, "Investigation of parameters affecting Organic Rankine Cycle efficiency by using Taguchi and ANOVA methods," *Aplica. Termia. Ing.*, vol.145, pp. 221-228, 2018.

[10.1016/j.applthermaleng.2018.09.032](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.032)

[33] C. Vidal, V. Infante, P. Peças, P. Vilaça," Application of Taguchi Method in the Optimization of Friction Stir Welding Parameters of an Aeronautic Aluminium Alloy," *En t. J. Adv. Madre. Fabricante. Carácter.* vol.3 pp. 21-26, 2013.

DOI:[10.11127/ijammc.2013.02.005](https://doi.org/10.11127/ijammc.2013.02.005)





[34] Y. Tan, M.A. Zulkifli, K. M. Abdullah, “Influence of Processing Parameters on Injection Molded Polystyrene Using Taguchi Method as Design of Experiment”, *Procedia Engineering*, vol. 184, pp. 350-359,2017.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.105>

[35] J. R. Lerma Valero, “Plastics injection molding,” 1st ed. Hanser Publications, 2020.

<https://www.grafiati.com/es/literature-selections/injection-molding-of-plastics/>

[36] Soporte de Minitab 21,” Seleccionar las gráficas que se mostrarán para Analizar diseño de Taguchi”, Copyright © 2023 Minitab, LLC. All rights Reserved,2023.

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/perform-the-analysis/select-the-analysis-graphs-to-display/?SID=63412>

Derechos de Autor (c) 2023 Elva Lilia Reynoso Jardón, Manuel de Jesús Nandayapa Alfaro, Quirino Estrada Barbosa, Oscar Tenango Pirin, Yahir de Jesús Mariaca Beltrán, Jacinto Fraire Bernal, Carlos Sebastián González Miranda



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)