

Centro de Enseñanza Técnica y Superior
Con reconocimiento de validez oficial de estudios del Gobierno del Estado de Baja
California según Acuerdo de fecha 10 de octubre de 1983



Rediseño de molde y carga de máquinas para reducción de fallas de calidad y liberación de capacidad instalada en proceso de moldeo por inyección de plástico

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencia de la Ingeniería

Presenta:

César Antonio Hernández Rico

Director:

Dr. Alejandro Guzman Ocegueda

Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad)

Tijuana, Baja California, México

2020

**REDISEÑO DE MOLDE Y CARGA DE MÁQUINAS PARA REDUCCIÓN
DE FALLAS DE CALIDAD Y LIBERACIÓN DE CAPACIDAD
INSTALADA EN PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN DE
PLÁSTICO**

Tesis/Proyecto de aplicación que para obtener el grado de Maestro en
Ciencias de la Ingeniería

Presenta:

César Antonio Hernández Rico

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Alejandro Guzman Ocegueda
Director de tesis

Dr. Xxxxx Xxxxxx Xxxxxx <negritas>

Nombre completo (miembro del comité)

Dr. Xxxxx Xxxxxx Xxxxxx <negritas>

Nombre completo (miembro del comité)

Dr. Xxxxx Xxxxxx Xxxxxx <negritas>

Nombre completo (miembro del comité)

Dra. Xxxxx Xxxxxx Xxxxxx <negritas>

Nombre completo (miembro del comité)

Dr. Ricardo Martinez Soto

Coordinador del Posgrado en Ingeniería

César Antonio Hernández Rico © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta **César Antonio Hernández Rico** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Rediseño de molde y carga de máquinas para reducción de fallas de calidad y liberación de capacidad instalada en proceso de moldeo por inyección de plástico

Resumen aprobado por:

Dr. Alejandro Guzman Ocegueda
Director de tesis

La tesis de este documento está centrada en un proceso de producción de piezas plásticas mediante el moldeo por inyección de plástico, la problemática planteada fue el alto porcentaje de scrap generado con los moldes actuales (alrededor de 5.32% mostrado en las figuras 17 y 18) y el alto porcentaje de capacidad instalada requerida para la producción del producto 2610013854 (alrededor de 65% de utilización total de seis centros de trabajo-máquinas de moldeo), los fallos de calidad fueron reducidos de 5.32% a 0.11%, y la capacidad instalada de máquinas de moldeo fue incrementada de 40.67% a 76.21% con un nivel de confianza y confiabilidad de 95%, mostrados en la tabla 17.

Lo anterior fue logrado mediante el rediseño de un molde nuevo de colada caliente, de ocho cavidades, de inserción y doble tiro con motor de desenroscado activado hidráulicamente, seguido de una evaluación basada en Diseño para Manufactura y Ensamble y una evaluación de un reporte de simulación de flujo apoyado por el Software MoldFlow Adviser.

Todo lo anterior fue posible mediante la aplicación de herramientas estadísticas como el diseño de experimentos factorial, ANOVA, pruebas de normalidad, estudios de capacidad de proceso, entre otras.

Palabras clave: Diseño de experimentos, ANOVA, prueba de hipótesis, moldeo por inyección, colada caliente, colada fría, carga de máquinas.

Abstract of the thesis presented by **César Antonio Hernández Rico** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Industrial Systems and Processes with orientation in

Redesign of mold and shop loading to reduce quality issues and release of installed capacity in plastic injection molding process

Abstract approved by:

Dr. Alejandro Guzman Ocegueda
Thesis' Director

The thesis described on this document is focused on a production process of plastic parts throughout plastic injection molding, the main problem to find a solution was the high scrap percentage issue generated by existing molds (about 5.32% mentioned in figures 17 and 18), and high percentage of machine utilization required for the production of product 2610013854 (about 65% of total usage of six work centers-injection molding machines) quality issues were reduced from 5.32% to 0.11%, and available installed capacity was increased from 40.67% to 76.21%, using confidence and reliability levels of 95%, shown in table 17.

The above mentioned was accomplished through the redesign of a new mold with hot runner system, eight cavities, insertion and two-shot with a hydraulically actuated unscrewing motor, followed by an evaluation based on Design for Manufacturability and Assembly and an evaluation of a Mold Flow Analysis aided by MoldFlow Adviser Software.

All of the above was possible through the application of statistical tools such as factorial design of experiments, ANOVA, normality tests, studies of process capacity, among others.

Keywords: Design of experiments, ANOVA, hypothesis test, plastic injection molding, hot runner, cold runner, machine loading.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a todas las personas que de alguna manera fueron mi soporte, motivación y apoyo para su culminación, a todos los que en algún momento fueron víctimas del cansancio, frustración y felicidad que implicó este proceso, a todos los que les importó que este momento llegara.

Agradecimientos

A mi amada madre por su apoyo incondicional y motivación excepcional desde el día 1 de mi vida, a mi amada novia que fue mi porrista número 1, me hizo sentir que todo es posible y estuvo conmigo sin condiciones día y noche durante estos años, también a sus padres que me dieron asilo y me alimentaron infinidad de noches al concluir las clases, a mi hermana por darme asilo entre las clases nocturnas y mañaneras de Viernes y Sábado, a mi hermano mayor por hacerme sentir que el esfuerzo merece la pena y que no es en vano, a mi padre que con su interés frecuente me motivaba a concluir esto con éxito, y a mis pequeños hermanos Goku y Candy por estar cada noche al llegar a casa mientras pudieron.

Tabla de contenido

Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas.....	x
Capítulo 1. Introducción	xi
Capítulo 2. Antecedentes.....	xii
2.1 Proceso de moldeo por inyección de plástico	xiv
2.1.1 Tipos de molde	xiv
2.1.2 Tipos de aceros utilizados y vida útil	xvii
2.1.3 Moldeo por inserción y de doble tiro	xvii
2.1.4. Diseño Para Manufactura y Ensamble (DfMA)	xix
2.1.5 Análisis de Simulación de Flujo	xxi
2.1.6 Diseño de Experimentos (DOE por sus siglas en inglés “ <i>Design Of Experiments</i> ”)... ..	xxii
2.1.7 Determinación de Ventana de Parámetros Críticos de Proceso.....	xxiii
2.1.8 Protocolos de Calificación de Instalación (IQ por sus siglas en inglés “ <i>Installation Qualification</i> ”), Operación (OQ por sus siglas en inglés “ <i>Operation Qualification</i> ”) y Desempeño (PQ por sus siglas en inglés “ <i>Performance Qualification</i> ”).....	xxiv
2.1.9 Modos de falla en el proceso de moldeo por inyección de plástico.....	xxv
2.2 Carga de máquinas.....	xxvii
2.2.1 Método húngaro o problemas de asignación.	xxvii
2.2.2 Método de índices.....	xxviii
2.2.3 Programación lineal	xxix
Capítulo 3. Definición del problema	xxx
3.1 Planteamiento y justificación del problema	xxx
3.2 Hipótesis nula y alternativa	xxxii
3.3 Objetivos generales y específicos	xxxii
Capítulo 4. Metodología	xxxiv
4.1 Estudio de Diseño Para Manufactura para rediseño de molde nuevo.	xxxv
4.2 Análisis de simulación de flujo para rediseño de molde nuevo.	xxxv
4.3 Determinación de tamaño de muestra.....	xxxvi
4.4 Diseño y desarrollo de Diseño de Experimentos	xxxvi

4.5 Método para solucionar el problema de cargas de máquina para liberación de capacidad instalada.	xxxvii
Capítulo 5. Resultados	xxxix
5.1 Diseño para Manufactura y Ensamble de molde	xxxix
5.2 Determinación de tamaño de muestra para la validación del nuevo molde	xl
5.3 Desarrollo de protocolos de validación y ventana de parámetros críticos de proceso.	xli
5.4 Diseño de experimentos para validación del molde nuevo	xli
Capítulo 6. Discusión de resultados.....	lviii
6.1 Comparativo de antes y después de implementación de molde nuevo	lix
Tabla 17. Comparativo antes y después de implementación de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.	lix
Capítulo 7. Conclusiones	lx
Capítulo 8. Referencias.....	lxi

Lista de figuras

Figura 1. Mercado global de plásticos producidos por moldeo, por aplicación. Fuente: (Kumar 2019).....	xxix
Figura 2. Tamaño de mercado del mercado de moldeo de plástico proyectado de 2016 a 2027 en billones de dólares americanos. Fuente: (Kumar, 2019).	xxx
Figura 3. Sub procesos básicos del moldeo por inyección de plástico. Fuente: (Elaboración propia).	xxxii
Figura 4. Esquema de la composición de un molde de inyección de plástico.....	xxxii
Fuente: (Beaumont, 2004).....	xxxii
Figura 5. Esquema básico de molde de colada fría y colada caliente. Fuente: (De Vos, 2016).	xxxiii
Figura 6. Esquema de moldeo por inserción. Fuente: (Bernhardt, 1983).	xxxvi
Figura 7. Esquema de moldeo de doble tiro Fuente: (Fetecau, 2010).....	xxxvi
Figura 8. Ejemplo de reporte DfMA para diseño de un molde nuevo. Fuente: (DiBastiani, 2015).	xxxviii
Figura 9. Herramientas básicas de apoyo para diseño y manufactura de moldes nuevos. Fuente: (DiBastiani, 2015).....	xxxviii
Figura 10. Ejemplo de reporte de simulación de flujo, mostrando el tiempo de llenado de un rotor. Fuente: (Robert Bosch, 1985).....	xxxix
Figura 11. Esquema de variables de entrada y salida en un proceso. Fuente: (Gutierrez, 2008).	xl
Figura 12. Determinación de ventana de parámetros críticos de proceso de moldeo por inyección de plástico. Fuente: (Garcia, 2012).	xli
Figura 13. Forma matemática del modelo del método húngaro. Fuente: (Lieberman, 2010).	xliv
Figura 14. Modelo matemático para el método de programación lineal. Fuente: (Lieberman, 2010).	xlvi
Figura 15. Diseño tridimensional de producto 2610013854. Fuente: (Robert Bosch GmbH, 2012).	xlvii
Figura 16. Proceso descriptivo para producción de PN 2610013854. Fuente: Elaboración propia.	xlvii
Figura 17. Modos de falla en número de parte 2610013854 reportados de enero 2018 a diciembre 2019. Fuente: Elaboración propia.....	xlviii
Figura 18. Causas de modos de falla en número de parte 2610013854 reportados de enero 2018 a diciembre 2019. Fuente: Elaboración propia.	xlviii
Fig. 19. Flujo de desarrollo de metodología. Fuente: Elaboración propia.....	1
Fig. 20. Esquema de Diseño para Manufactura y Ensamble de molde nuevo. Fuente. Elaboración propia.	liv

Fig. 21. Esquema de Diseño para Manufactura y Ensamble de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lv
Fig. 22. Diseño bidimensional del producto 2610013854 ilustrando dimensión crítica. Fuente: (Robert Bosch GmbH, 2012).....	lvi
Fig. 23. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 1. Fuente: Elaboración propia.....	lxi
Fig. 24. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 2. Fuente: Elaboración propia.....	lxii
Fig. 25. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 3. Fuente: Elaboración propia.....	lxiii
Fig. 26. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 4. Fuente: Elaboración propia.....	lxiv
Fig. 27. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 5. Fuente: Elaboración propia.....	lxv
Fig. 28. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 6. Fuente: Elaboración propia.....	lxvi
Fig. 29. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 7. Fuente: Elaboración propia.....	lxvii
Fig. 30. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 8. Fuente: Elaboración propia.....	lxviii
Fig. 31. Estudio de capacidad de proceso cavidad 1 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lxix
Fig. 32. Estudio de capacidad de proceso cavidad 2 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lxx
Fig. 33. Estudio de capacidad de proceso cavidad 3 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lxxi
Fig. 34. Estudio de capacidad de proceso cavidad 4 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lxxii
Fig. 35. Estudio de capacidad de proceso cavidad 5 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lxxiii
Fig. 36. Estudio de capacidad de proceso cavidad 6 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lxxiv
Fig. 37. Estudio de capacidad de proceso cavidad 7 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lxxv
Fig. 38. Estudio de capacidad de proceso cavidad 8 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	lxxvi

Lista de tablas

Tabla 1. Diferentes métodos de moldeo de plástico y ejemplos. Fuente: (Bryce, 1996).	.xi
Tabla 2. Clasificación de clases de molde, vida útil y características generales. Fuente: (De Vos, 2016).	xvi
Tabla 3. Ejemplo de método de índices. Fuente: (Lieberman, 2010).	xxvi
Tabla 4. Diseño factorial de experimento a desarrollar. Fuente: Elaboración propia.	xxxiii
Tabla 5. Planteamiento del problema de asignación previo a la implementación de carga de máquinas. Fuente: Elaboración propia.	xxxiv
Tabla 6. Planteamiento del problema de asignación posterior a la implementación de carga de máquinas. Fuente: Elaboración propia.	xxxiv
Tabla 7. Método de validación de parámetros críticos de proceso de molde mediante Calificación de Operación basado en norma ISO 13485. Fuente: Elaboración propia.	xxxvi
Tabla 8. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 1. Fuente: Elaboración propia.	xxxvii
Tabla 9. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 2. Fuente: Elaboración propia.	xxxviii
Tabla 10. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 3. Fuente: Elaboración propia.	xxxviii
Tabla 11. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 4. Fuente: Elaboración propia.	xxxix
Tabla 12. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 5. Fuente: Elaboración propia.	xxxix
Tabla 13. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 6. Fuente: Elaboración propia.	xl
Tabla 14. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 7. Fuente: Elaboración propia.	xl
Tabla 15. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 8. Fuente: Elaboración propia.	xli
Tabla 16. Sumario de índices de capacidad de proceso por cavidad del molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.	liv
Tabla 17. Comparativo antes y después de implementación de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.	lv

Capítulo 1. Introducción

El plástico es uno de los materiales mayormente utilizados como materia prima en la fabricación de productos a nivel global (Kumar, 2019).

La tesis de este documento está centrada en un proceso de producción de piezas plásticas mediante el moldeo por inyección de plástico, la problemática planteada fue el alto porcentaje de scrap generado con los moldes actuales y el alto porcentaje de capacidad instalada requerida para la producción del producto 2610013854, los fallos de calidad fueron reducidos de 5.32% a 0.11%, y la capacidad instalada de máquinas de moldeo fue incrementada de 40.67% a 76.21% con un nivel de confianza y confiabilidad de 95%, mostrados en la tabla 17.

Lo anterior fue logrado mediante el rediseño de un molde nuevo de colada caliente, de ocho cavidades, de inserción y doble tiro con motor de desenroscado activado por motor hidráulico, seguido de una evaluación basada en Diseño para Manufactura y Ensamble y una evaluación de un reporte de simulación de flujo apoyado por el Software MoldFlow Adviser.

Posterior a la simulación de diseño y proceso con apoyo de diferentes Softwares, una ventana de parámetros críticos del proceso de moldeo fue determinada mediante la metodología de Moldeo Científico (RJG Inc, 1999), así como la determinación de un tamaño de muestra basado en porcentajes de confianza y confiabilidad.

Posteriormente, protocolos y reportes de validación de instalación (IQ), operación (OQ) y desempeño (PQ) fueron desarrollados de acuerdo con la norma ISO 143485 utilizando los valores nominales de la ventana de parámetros críticos obtenida durante el Moldeo Científico, para finalmente, diseñar y realizar un Diseño de Experimentos factorial para la optimización de variables y atributos críticos del producto final en conjunto con un análisis de solución de carga de máquinas para liberación parcial de capacidad instalada.

Todo lo anterior fue posible mediante la aplicación de herramientas estadísticas como el diseño de experimentos factorial, ANOVA, pruebas de normalidad, estudios de capacidad de proceso, entre otras.

Capítulo 2. Antecedentes

El mercado global de plásticos producidos mediante moldeo fue valorado cerca de 258.2 millones de dólares en 2019, principalmente desarrollado para productos de empaque, consumibles y electrónicos, automotrices y de transporte, de construcción, médicos, entre otros, mostrados en la figura 1 (Kumar, 2019).

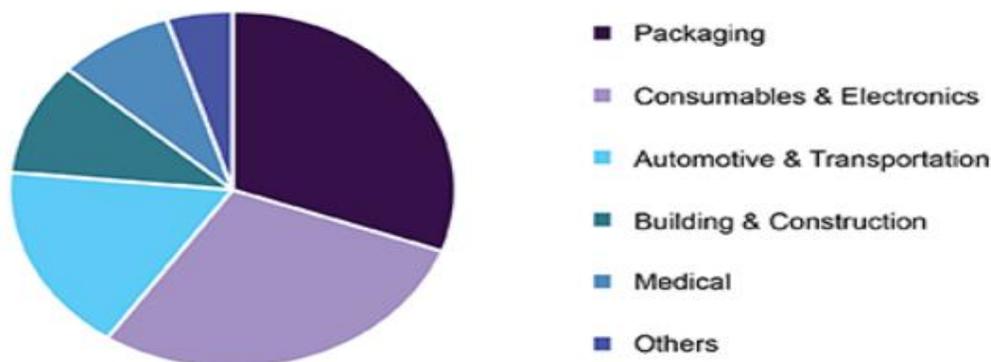


Figura 1. Mercado global de plásticos producidos por moldeo, por aplicación. Fuente: (Kumar 2019).

El crecimiento de la industria de moldeo de plástico proyecta un crecimiento significativo para los siguientes 7 años, y pueden identificarse los materiales con mayor aportación a tal crecimiento (polipropileno, acrilonitrilo butadieno estireno, polietileno de alta densidad, polipropileno, entre otros) y generación de productos, la figura 2 muestra un pronóstico de tal crecimiento representado en billones de dólares americanos (Kumar, 2019).

U.S. injection molded plastics market size, by raw material, 2016-2027 (USD Billion)

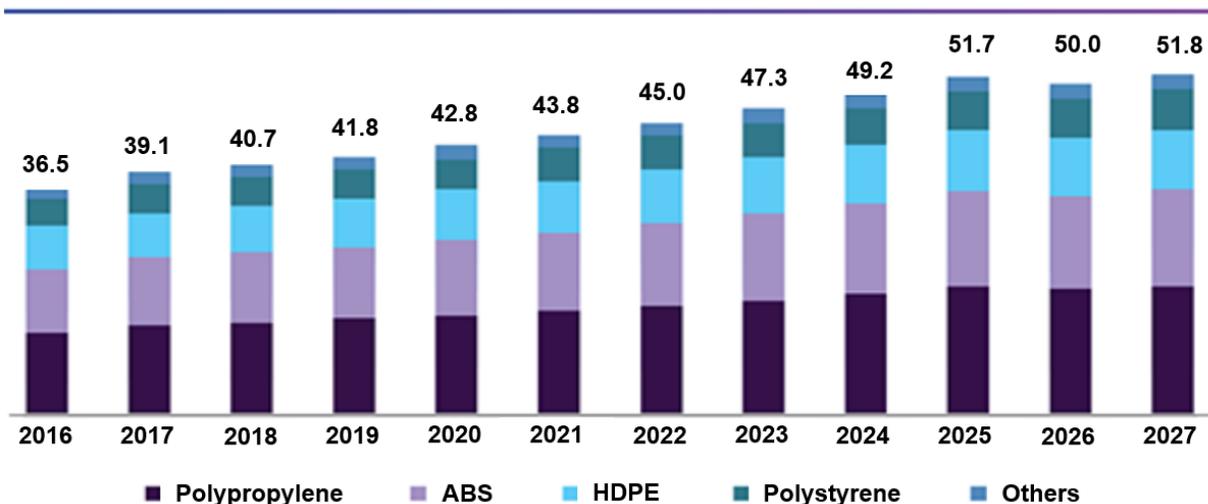


Figura 2. Tamaño de mercado del mercado de moldeo de plástico proyectado de 2016 a 2027 en billones de dólares americanos. Fuente: (Kumar, 2019).

Existen dos tipos de plásticos: los termoplásticos y los termoestables. Los termoplásticos son derretibles y los termoestables no lo son. La diferencia está en cómo son formados los polímeros. Los polímeros, o cadenas de átomos, son en los termoplásticos, cuerdas unidimensionales, y al derretirse, pueden adquirir una forma nueva. En los termoestables son redes tridimensionales y siempre conservan su forma. Una gran variedad de procesos son desarrollados para formar o moldear plásticos, algunos sólo sirven para termoplásticos, otros sólo para los termoestables, y algunos procesos sirven para ambos (Kumar, 2019).

La figura 3 muestra un listado de los diferentes métodos de moldeo de plástico existentes, en la columna izquierda está el método, y en la derecha algún ejemplo.

Tabla 1. Diferentes métodos de moldeo de plástico y ejemplos. Fuente: (Bryce, 1996).

Moldeo por inyección :	cubeta, silla
Moldeo por soplado :	botellas
Moldeo por extrusión:	tubo, manguera
Moldeo por laminado :	tabla
Moldeo por transferencia:	paquete de circuito integral
Moldeo al vacío:	empaque para huevos
Moldeo por presión:	cobertura del helicóptero
Moldeo por espumado:	esponja para cojín
Moldeo por inyección de resina termofija:	caja para el interruptor de fuente eléctrica
Moldeo por compresión:	caja para el interruptor de fuente eléctrica
Moldeo por <i>slush</i> :	muñeca que toma leche
Moldeo por <i>casting</i> :	sello para muestras biológicas
Moldeo por inmersión:	guantes, globos
Moldeo por fluidificación:	sello para resistencia, tarja
Moldeo rotatorio:	flotador para pesca
Moldeo por calandaria :	asiento
Moldeo por inyección de reacción (RIM) :	defensa vehicular
Moldeo por pultrusion:	barra de resina termofija
Moldeo por soplado de película:	bolsa

Formula Plastics es una compañía ubicada en la ciudad de Tecate, Baja California, México, cuyo giro principal es el servicio de productos moldeados mediante inyección de plástico del sector médico, automotriz, electrónico y sector comercial. Algunos de los proyectos principales de la compañía están enfocadas a la liberación de capacidad instalada, reducción de fallas de calidad y optimización de procesos y diseños de herramientas, en este caso, moldes de colada fría y/o caliente.

2.1 Proceso de moldeo por inyección de plástico

El proceso de moldeo por inyección de plástico fue extendido globalmente desde el año 2000, debido, principalmente, a los beneficios técnicos y económicos obtenidos comparado con otros procesos de transformación de materiales y a la gama de productos con requerimientos tan específicos y complejos producidos mediante este proceso, superando al tipo de materiales como acero, aluminio, metal, entre otros (Pulido, 2004).

El proceso implica diversas operaciones, métodos y características referentes a la fabricación del producto, como lo es la automatización, diseño y estudio de herramientas con base en su rentabilidad, estudios de carga de máquinas para maximizar la utilidad de centros de trabajo, proyectos de mejora para ahorro de materia prima y optimización de procesos (Pulido, 2004).

La definición principal de este proceso es: “proceso de fabricación semicontinuo, el cual consiste en inyectar un polímero en el interior de un molde cerrado bajo ciertos parámetros específicos, como temperatura, presión, entre otros. Posterior a la inyección del polímero, es solidificado y finalmente es expulsado del molde de manera automática o manual, dependiendo del proceso diseñado” (Albarrán, 2014).

La figura 3 muestra un esquema de los subprocesos básicos del proceso de moldeo por inyección de plástico.

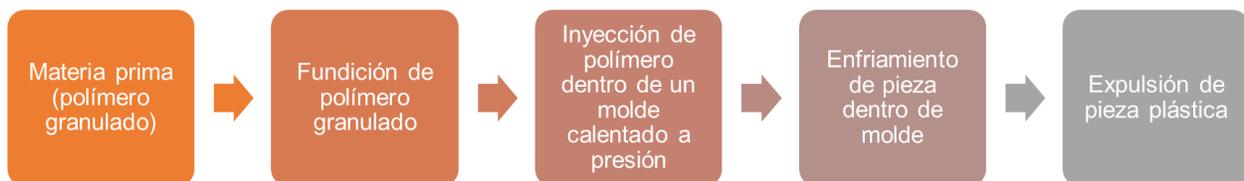


Figura 3. Sub procesos básicos del moldeo por inyección de plástico. Fuente: (Elaboración propia).

El moldeo por inyección de plástico permite el uso de diferentes tipos de molde, dependiendo de la aplicación final de producto, presupuesto destinado para cierto proyecto, vida esperada del molde, entre otras consideraciones. Los factores principales tomados en cuenta para la fabricación de un molde son: tipo de resina para moldear el producto, ciclos de vida garantizados del molde, cantidad de colada o corredor esperada generar y/o reutilizar, complejidad del producto a moldear (dimensiones críticas, componentes incrustados, piezas de doble tiro) (De Vos, 2016).

2.1.1 Tipos de molde

Los moldes utilizados para moldeo por inyección de plástico están formados principalmente por dos mitades: mitad fija y mitad móvil. La parte fija no sufre movimiento cuando la máquina de inyección realiza todos sus movimientos, está sujeta al plato de la máquina, donde son apoyados el aro centrado y la boquilla inyección para introducir el

polímero fundido al molde, estando la parte móvil sujeta al plato móvil de la máquina y moviéndose durante cada ciclo, y es en esta mitad donde está normalmente ubicada el sistema de expulsión de la pieza (Beaumont, 2004).

La figura 4, muestra un esquema básico de la composición de molde de inyección de plástico.

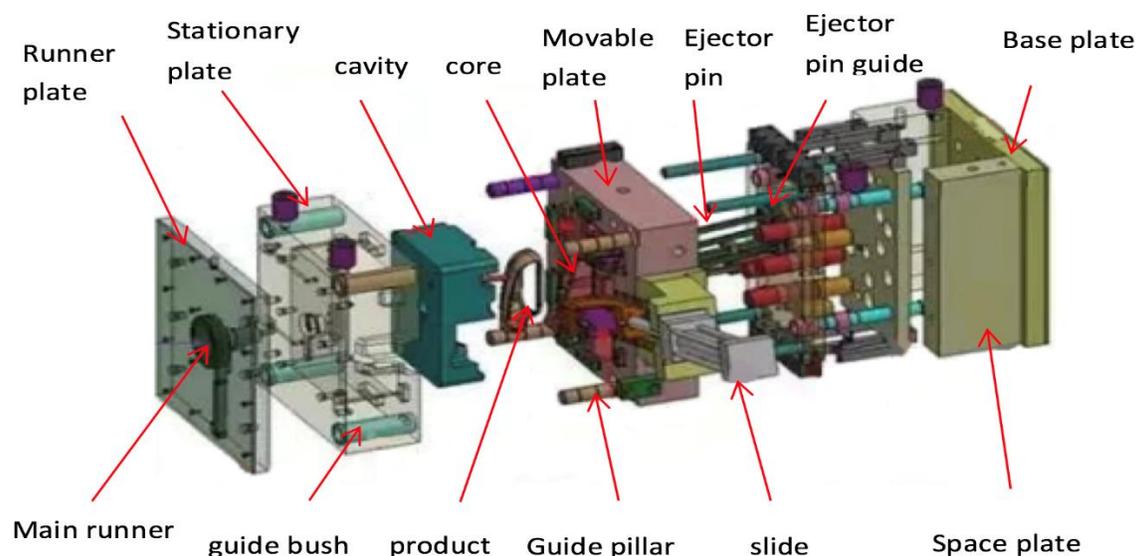


Figura 4. Esquema de la composición de un molde de inyección de plástico.
Fuente: (Beaumont, 2004).

Los tipos de molde pueden clasificarse en dos tipos; sistemas de colada fría o de colada caliente. La figura 5, muestra un esquema general de ambos sistemas, y muestra la diferencia principal entre ellos: la existencia de un corredor en el sistema de colada fría, y la inexistencia, o existencia mínima, de un corredor en el sistema de colada caliente (Beaumont, 2004).

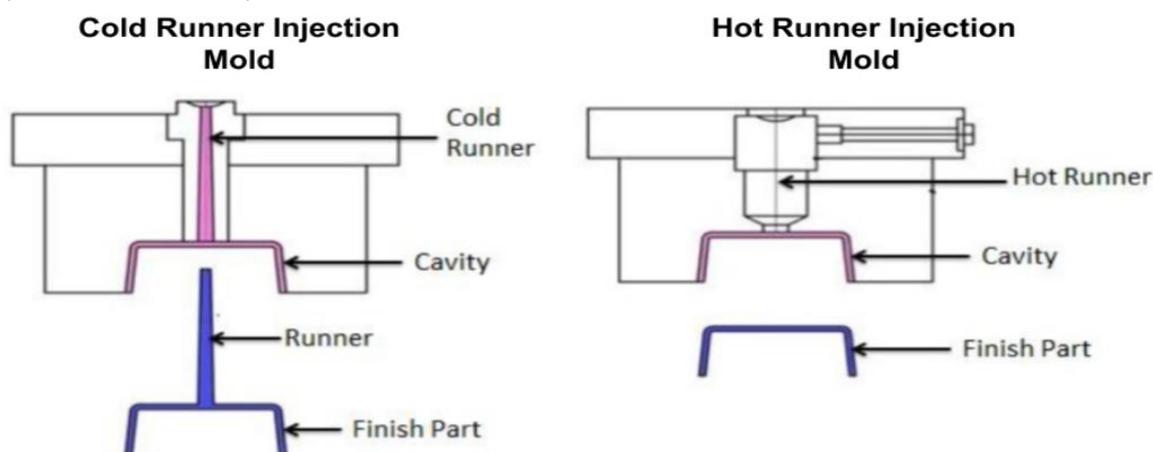


Figura 5. Esquema básico de molde de colada fría y colada caliente. Fuente: (De Vos, 2016).

- ✚ Sistemas de colada fría: Los sistemas de colada fría pueden conformarse de dos o tres placas situadas entre la base fija y móvil del molde, cuando el plástico es inyectado en el molde, atraviesa el bebedero y posteriormente el plástico pasa por la colada antes de entrar finalmente en la cavidad del molde a través del punto de inyección (Pye, 2016).

Un molde de dos placas, la estructura de la colada y las partes de la cavidad están unidas para separar a ambas del molde, es necesario utilizar un sistema de expulsión. En un molde de tres placas, la colada está localizada en una placa separada de la parte plástica, como resultado, las partes de la cavidad pueden ser expulsadas por sí solas (Pye, 2016).

El corredor resultante de un molde de dos o tres placas puede ser molido y reutilizado durante el proceso de moldeo para reducir residuos de plástico, siempre y cuando el dueño del producto lo autorice y considere las siguientes repercusiones potenciales:

- a) Incremento de tiempo de ciclo
- b) Degradación de resina, disminuyendo propiedades mecánicas del producto moldeado
- c) Discrepancia en apariencia del producto por reprocesamiento de resina

- ✚ Sistemas de colada caliente: Los sistemas de colada caliente, consisten en dos placas calentadas en conjunto con un múltiple, el sistema dirige el plástico fundido a boquillas especiales, y finalmente son conducidas a las cavidades del molde (Pye, 2016).

El sistema de colada caliente puede ser calentado interna o externamente por medio de resistencias, en el tipo calentado internamente, el operador puede controlar el flujo del plástico, en el tipo calentado externamente no, pero es apto para resinas sensibles a cambios de temperatura (Pye, 2016).

El sistema de moldeo de colada caliente no genera residuos de colada en absoluto (corredor), por lo tanto, el molido y reciclado no son factor para el procesamiento del producto, al contrario, presentan las siguientes ventajas significativas:

- a) Menor tiempo de ciclo
- b) No existe desperdicio de colada
- c) Existe mayor control para el llenado de cavidades (peso de piezas)

Los moldes tienen una vida útil para ser considerados productivos en el proceso de moldeo por inyección de plástico, y son clasificados de acuerdo con ese límite productivo dependiendo del tipo de acero utilizado en su fabricación.

2.1.2 Tipos de aceros utilizados y vida útil

Las clasificaciones de moldes fueron desarrolladas por la Sociedad de Ingenieros Plásticos de EE. UU. (SPE), con la intención de tener una definición simplificada del tipo de herramienta de inyección para termoplásticos requerida para una necesidad de producción establecida.

Las especificaciones establecidas por la SPE tienen la intención de ser solo una referencia, dependiendo del tipo de proyecto o del cliente, para reflejar las expectativas específicas de una de estas herramientas.

Las diferentes clasificaciones dictarán diferencias en el diseño de herramientas, construcción, materiales y componentes, mostrados en la figura 4.

Las clasificaciones mencionadas, son pautas utilizadas para obtener cotizaciones y ordenar los tipos de moldes uniformes. A través de estas clasificaciones, deseamos realizar pedidos de moldes uniformes y bajo características específicas fundamentar el desarrollo de un nuevo producto.

Todos los moldes deben tener canales adecuados para el control de temperatura, y cuando sea posible, todos los detalles deben marcarse con el tipo de acero y la dureza Rockwell, una práctica común es estampar el nombre del cliente, el número de pieza y el número de molde en todos los moldes (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 2. Clasificación de clases de molde, vida útil y características generales. Fuente: (De Vos, 2016).

Clasificación de molde	Vida de molde en ciclos	Descripción
101	Más de 1,000,000	Construido para niveles extremos de producción, los materiales de la calidad más alta son utilizados.
102	Hasta 1,000,000	Construido para niveles altos de producción, adecuados para materiales abrasivos y tolerancias dimensionales cerradas.
103	Hasta 500,000	Construido para niveles medios de producción, adecuados para necesidades de producción regulares.
104	Hasta 100,000	Construido para niveles bajos de producción, limitados en capacidad y no recomendables para materiales abrasivos.
105	Hasta 500	Moldes prototipo, contruidos para una cantidad limitada de piezas prototipo, no son adecuados para producción en masa.

El moldeo por inyección de plástico acepta ciertas variantes en su proceso convencional, como el moldeo por inserción y de doble tiro (De Vos, 2016).

2.1.3 Moldeo por inserción y de doble tiro

El moldeo por inserción es un proceso de moldeo donde el polímero es moldeado alrededor de una pieza o piezas insertadas en la cavidad del molde, resultando en un ensamblaje integrado único, fuertemente unido, con el inserto o insertos incrustados por el plástico. Los insertos pueden ser de metal, de plástico, cerámica, o cualquier material

cuyas características térmicas le permitan soportar las temperaturas del molde durante el proceso de inyección (Bernhardt, 1983).

El moldeo por inserción puede realizarse de manera manual, insertando manualmente el insertos dentro de la cavidad del molde, o de manera automática, mediante un robot automatizado posicionando el inserto directamente en la cavidad (Bernhardt, 1983).

La figura 6 muestra un esquemático de moldeo por inserción.

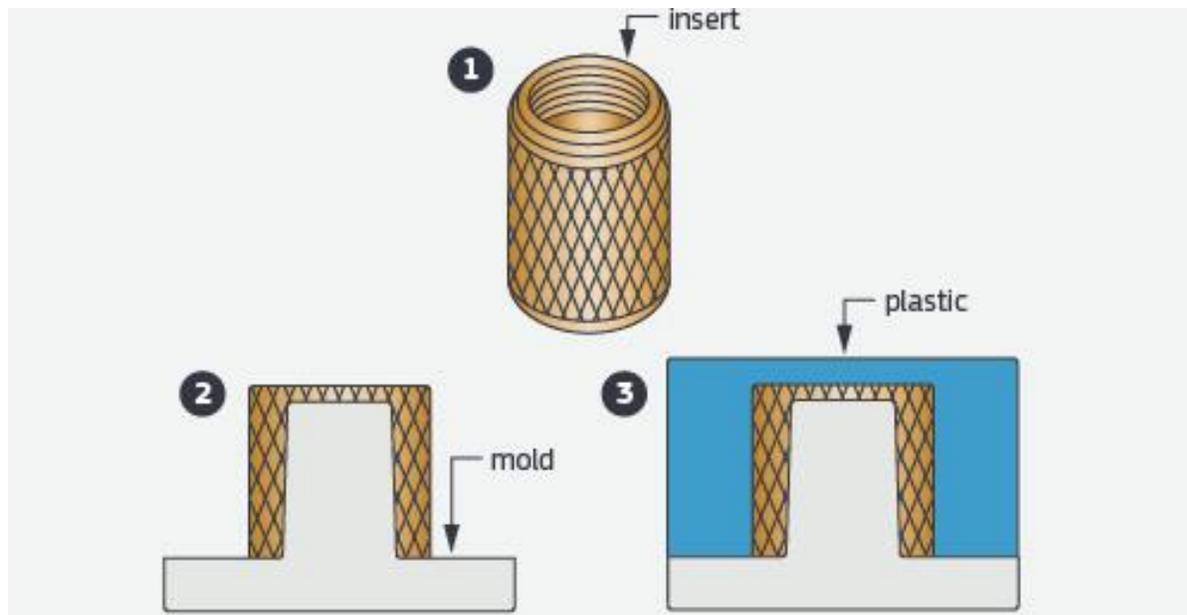


Figura 6. Esquema de moldeo por inserción. Fuente: (Bernhardt, 1983).

El moldeo de doble tiro es otra variante del proceso convencional de inyección de plástico, consiste en inyectar un polímero suave, usualmente un elastómero termoplástico, sobre un segundo material base, típicamente un plástico más rígido, formando una fuerte unión entre ambos materiales, manteniéndose para su uso final (Bernhardt, 1983). El moldeo de doble tiro puede desarrollarse de dos maneras:

- 1) Realizando las dos operaciones por separado en dos centros de trabajo distintos mediante máquinas de moldeo convencionales.
- 2) Realizando las dos operaciones en una máquina de moldeo de doble tiro inyectando ambos polímeros de manera simultánea.

La figura 7 muestra un esquemático de moldeo de doble tiro.

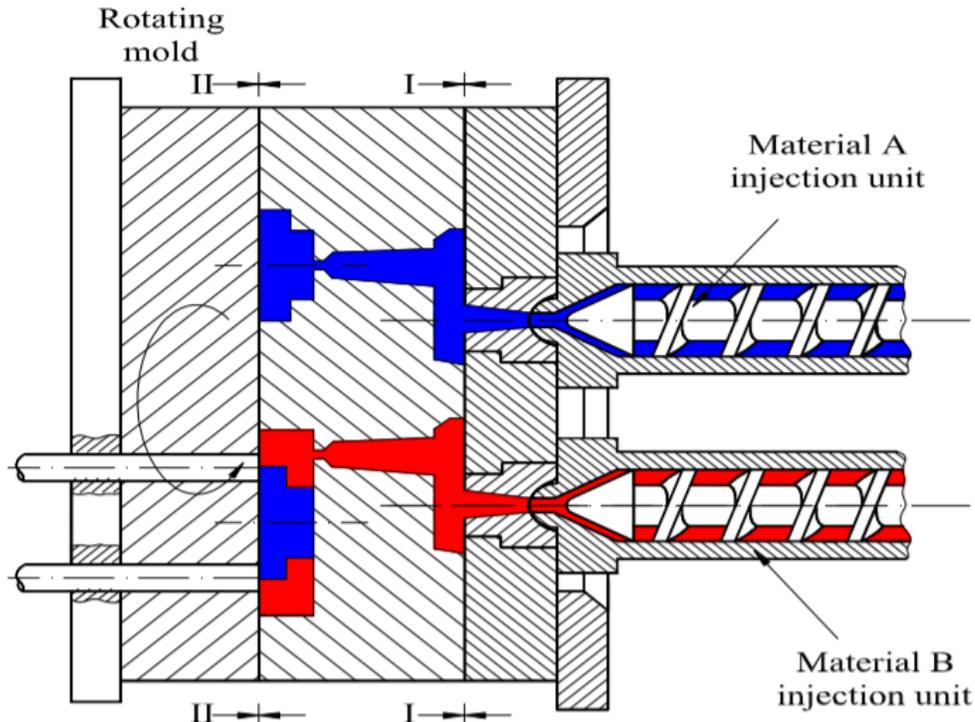


Figura 7. Esquema de molde de doble tiro Fuente: (Fetecau, 2010).

El proceso para diseñar y desarrollar un nuevo molde (independientemente del tipo), es apoyado generalmente en un estudio de Diseño Para Manufactura y Ensamble (DFMA por sus siglas en inglés "*Design For Manufacturing and Assembly*") y un Análisis de Simulación de Flujo (MFA por sus siglas en inglés ("*Mold Flow Análisis*") (Plastics Group, 2016).

2.1.4. Diseño Para Manufactura y Ensamble (DfMA)

El estudio del Diseño Para Manufactura y Ensamble de este molde permitirá identificar, mitigar, y mejorar las siguientes características durante el diseño de este:

- Evaluar los posibles impactos positivos y negativos de la resina a utilizar para moldear las piezas en este molde.
- Estudiar el diseño mecánico del molde, e identificar la mejor secuenciación de apertura, cierre y sistema de enfriamiento apto.
- Determinar las áreas de la pieza es permitido ubicar los puntos de inyección.
- Estudiar y diseñar el sistema más adecuado para la expulsión automática de las piezas del molde después de ser moldeadas.

- Analizar los ángulos de desmoldeo convenientes para el diseño del molde y estudios de espesor de pared típica (Wong, 2004).

La figura 8 muestra un ejemplo de un reporte DfMA para el estudio del diseño de un nuevo molde.

El estudio del diseño mecánico de un molde y el estudio de mecánica de fluidos interrelacionado con el proceso de moldeo de inyección son de vital importancia al diseñar un nuevo molde.

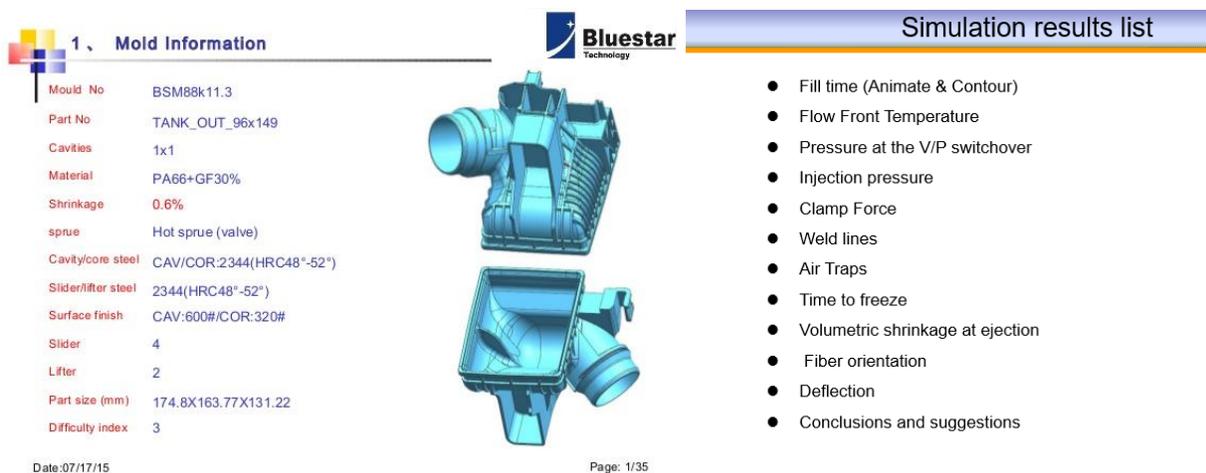


Figura 8. Ejemplo de reporte DfMA para diseño de un molde nuevo. Fuente: (DiBastiani, 2015).

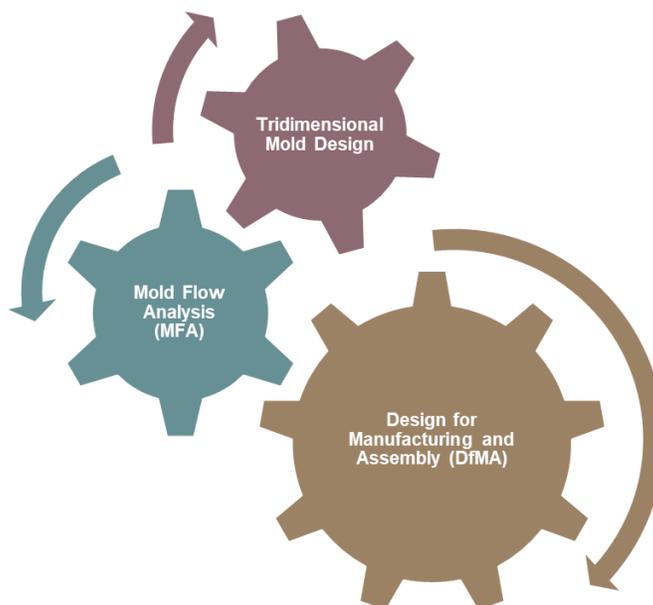


Figura 9. Herramientas básicas de apoyo para diseño y manufactura de moldes nuevos. Fuente: (DiBastiani, 2015).

2.1.5 Análisis de Simulación de Flujo

El análisis de flujo de moldes es el proceso de simular un ciclo de moldeo por inyección con un plástico en particular y analizar los resultados. El análisis del flujo del molde debe realizarse antes de comenzar con el proceso de moldeo por inyección, mediante el uso de un software especializado donde el diseño de la pieza a fabricar es simulado.

El flujo del material líquido en el molde hace una gran diferencia en el comportamiento del producto, por esa razón este paso puede ahorrar una gran cantidad de esfuerzo en el futuro durante el proceso productivo (Wong, 2004).

El software crea mapas de colores de diferentes propiedades del diseño y simulan el flujo real del molde. Los mapas de colores pueden incluir calentamiento / enfriamiento, patrón de llenado, presión de inyección, posibles trampas de aire, esfuerzo cortante, orientación de la fibra y muchas más propiedades (Wong, 2004).

El análisis de flujo de molde es un proceso cuidadoso y práctico destinado a expertos. Los mapas de colores creados por el análisis de flujo de molde ayudan en los cambios adaptativos del diseño para crear un producto de calidad antes de la puesta en marcha real del proceso de moldeo (Wong, 2004).

La simulación de flujo garantiza el desempeño exitoso de un prototipo o producto entre en producción. A pesar de la sobrecarga agregada al proceso, el análisis del flujo del molde lo compensa con creces en términos de calidad final (Wong, 2004).

La figura 10 muestra un ejemplo de simulación de flujo aplicado en una pieza plástica producida mediante moldeo por inyección de plástico.

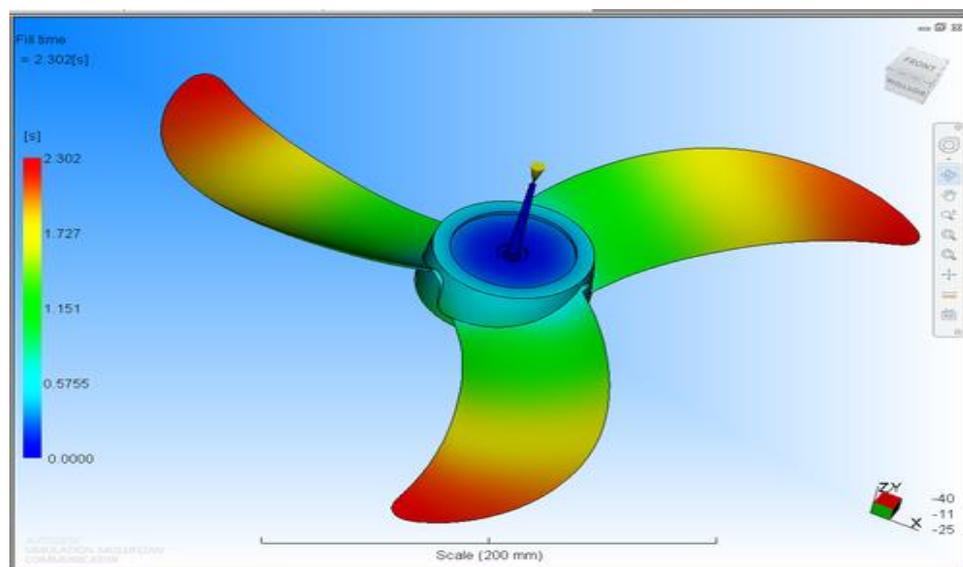


Figura 10. Ejemplo de reporte de simulación de flujo, mostrando el tiempo de llenado de un rotor. Fuente: (Robert Bosch, 1985).

2.1.6 Diseño de Experimentos (DOE por sus siglas en inglés “*Design Of Experiments*”)

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología ha ido consolidándose como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, permitiendo mejorar algunas situaciones complejas de relación causa-efecto (Gutierrez, 2008).

Un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, cuyo objetivo es medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado. Asimismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema. Por ejemplo, en un proceso químico se pueden probar diferentes temperaturas y presiones, y medir el cambio observado en el rendimiento (yield, ppm, defectivo) del proceso. Al analizar los efectos (datos) se obtiene conocimiento acerca del proceso químico, lo cual permite mejorar su desempeño (Gutierrez, 2008).

La unidad experimental es la pieza(s) o muestra(s) utilizadas para generar un valor representativo del resultado del experimento o prueba. En cada diseño de experimentos es importante definir de manera cuidadosa la unidad experimental porque ésta puede ser una pieza o muestra de una sustancia o un conjunto de piezas producidas, dependiendo del proceso estudiado. Por ejemplo, si se quiere investigar alternativas para reducir el porcentaje de piezas defectuosas, al producir muchas piezas en un lapso corto de tiempo, es clara la baja confiabilidad de la unidad experimental si solo es considerada una pieza, donde pueda verse si en una condición experimental estaba defectuosa o no. La unidad experimental será cierta cantidad de piezas producidas en las mismas condiciones experimentales, y al final se analizará cuántas de ellas están defectuosas y cuántas no (Gutierrez, 2008).

La figura 11 muestra los distintos tipos de variables o factores relacionados en cualquier proceso productivo, donde también se aprecian algunas interrogantes al planear un experimento.

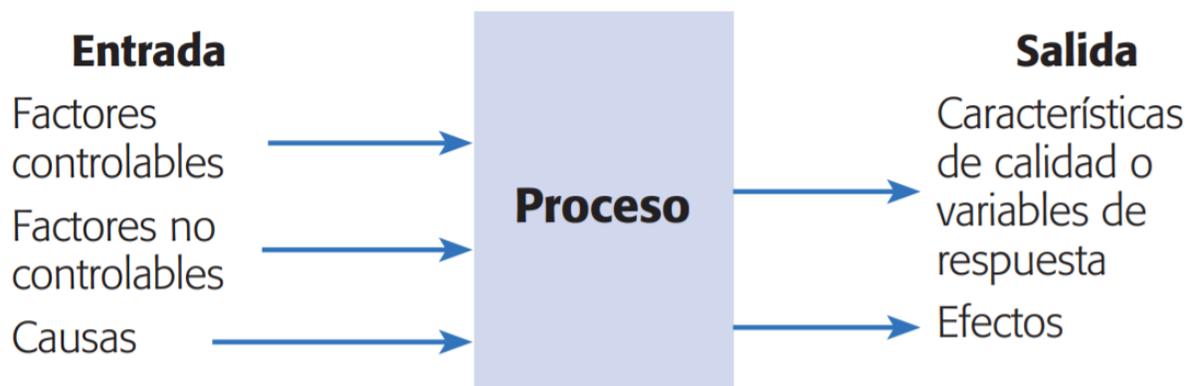


Figura 11. Esquema de variables de entrada y salida en un proceso. Fuente: (Gutierrez, 2008).

2.1.7 Determinación de Ventana de Parámetros Críticos de Proceso

La determinación de una ventana de parámetros críticos de proceso mediante la metodología de Moldeo Científico puede desglosarse en 10 consideraciones (RJG, 1985):

- 1) Seleccionar los parámetros de proceso con mayor impacto significativo en las variables de salida y más susceptibles a variación durante el proceso normal de producción.
- 2) Diseñar un DOE para maximizar las variables de salida.
- 3) Diseñar un DOE orientado a obtener un producto de la multiplicación de corridas, y muestras a ser medidas igual a 27.
- 4) Determinar un ajuste superior (+1), nominal (0) e inferior (-1) para cada uno de los tratamientos del DOE donde se asignará el mayor rango potencial del proceso.
- 5) Los valores nominales de los tratamientos deben ser considerados como los valores ideales, en esta condición lo esperado es producir 100% de piezas aceptables.
- 6) Los ajustes superior e inferior deben tener la misma magnitud en los ajustes de parámetros.
- 7) Seleccionar valores relacionados con la variación dimensional de las piezas.
- 8) Limitar los ajustes inferiores y superiores para no producir límites de seguridad y no comenzar a generar piezas incompletas o con rebaba.
- 9) Identificar y medir todas las piezas producidas de acuerdo con el número de corrida, cavidad y repetición correspondiente (previamente efectuado un estudio de repetibilidad y reproducibilidad con un porcentaje de variación total $\leq 30\%$).
- 10) Determinar los parámetros de proceso óptimos mediante una rutina de datos apoyada por un software estadístico como Minitab o Wisdom.

La figura 12 muestra un ejemplo de la estructura de una ventana de parámetros críticos de moldeo por inyección de plástico.

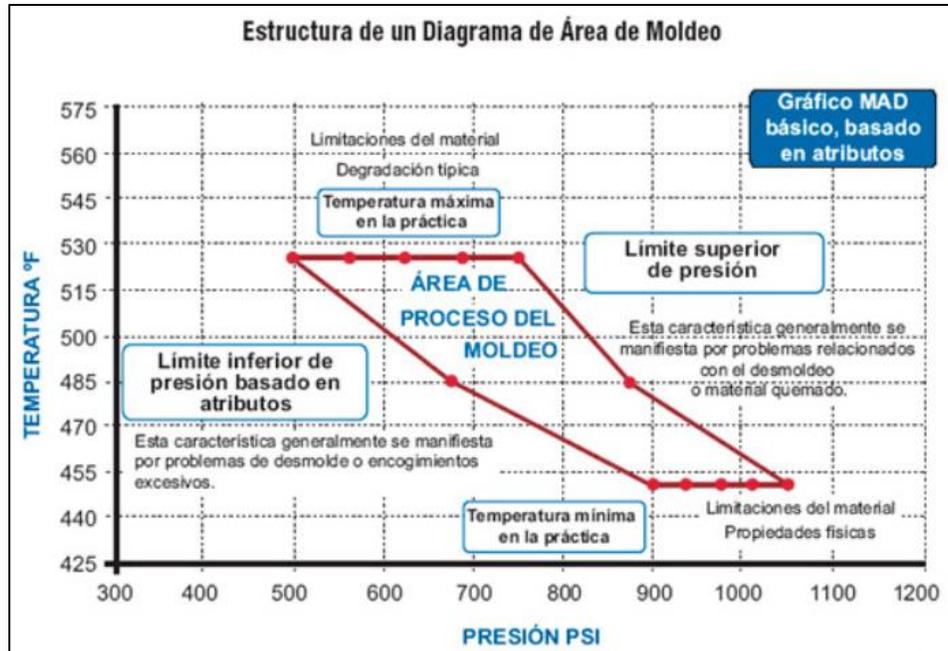


Figura 12. Determinación de ventana de parámetros críticos de proceso de moldeo por inyección de plástico. Fuente: (García, 2012).

2.1.8 Protocolos de Calificación de Instalación (IQ por sus siglas en inglés “*Installation Qualification*”), Operación (OQ por sus siglas en inglés “*Operation Qualification*”) y Desempeño (PQ por sus siglas en inglés “*Performance Qualification*”)

- Calificación de Instalación: Mediante la calificación de instalación se verifica la correcta instalación de los componentes físicos de un equipo, el cumplimiento de la calibración y la verificación del funcionamiento y ubicación del mecanismo de seguridad, también se verifica la existencia de los procedimientos correspondientes y los registros de los mantenimientos preventivos completados apropiadamente (Rodríguez, 2004).
- Calificación de Operación: La calificación de operación identifica las variables operativas críticas para un equipo o sistema a través de la caracterización del proceso (ventana de parámetros críticos utilizados con base en sección 2.1.6). La calificación establece, por evidencia objetiva, los límites de control del proceso y los niveles de acción dando como resultado un producto en cumplimiento con requerimientos específicos (Rodríguez, 2004).
- Calificación de Desempeño: La calificación de desempeño de un proceso establece, por evidencia objetiva, las variables de salida de un proceso en cumplimiento con requerimientos específicos, bajo condiciones anticipadas. El objetivo principal de esta

calificación es demostrar la consistencia de un proceso bajo condiciones normales de operación, considerando la variación natural de las variables críticas preestablecidas (Rodríguez, 2004).

Mediante los protocolos de validación de calificación de instalación, operación y desempeño, los métodos y criterios y aceptación para el equipo, instalación y proceso son definidos para un producto específico, mediante la presentación de evidencia objetiva (Rodríguez, 2004).

El moldeo por inyección es un proceso donde pueden presentarse múltiples modos de falla en el producto, los problemas de calidad en los productos pueden variar desde efectos superficiales menores, hasta problemas críticos relacionados a los aspectos de seguridad, rendimiento o función del producto (Plastics Group, 2016).

Los problemas de calidad en las piezas moldeadas mediante este proceso pueden presentarse por incidente con el proceso mismo de moldeo, materia prima, diseño de herramientas, método de producción, o una combinación de todos los anteriores (Plastics Group, 2016).

2.1.9 Modos de falla en el proceso de moldeo por inyección de plástico

Los defectos en el moldeo por inyección de plástico pueden ser difíciles y/o costosos de solucionar, algunos pueden evitarse mediante las siguientes acciones:

- Reajustando y controlando los parámetros críticos de proceso
- Rediseñando la herramienta o producto
- Cambiando el sistema de inyección de la herramienta
- Automatizando procesos dependientes
- Adaptando o corrigiendo máquina de moldeo utilizada

Los modos de falla más comunes en el proceso de moldeo por inyección de plástico son los siguientes:

- ❖ **Marcas de hundimiento:** Defectos en las piezas causados por una escasez de materia prima o por un exceso de calor de la pieza, debido a ello el material es contraído en el centro y producido el fenómeno conocido como “hundido”. Para evitarlo, es aconsejable empaquetar más plástico dentro de la cavidad, o bien aumentando el nivel y duración de la presión de segunda etapa (De Vos, 2016).
- ❖ **Líneas de Soldadura:** Ejerciendo control sobre la ubicación del punto de inyección y los parámetros del proceso pueden reducir el debilitamiento, el cual en ocasiones es dado porque los frentes de flujo son unidos alrededor del agujero en la pieza, es imposible eliminar una línea de soldadura en una pieza de plástico, sin embargo, es importante definir el número de compuertas, directamente relacionado con el número y ubicación de las líneas de soldadura en el producto (De Vos, 2016).

- ❖ Encogimiento. Cada resina utilizada durante el proceso de moldeo por inyección de plástico posee diferentes propiedades mecánicas y térmicas, en este caso, el factor de encogimiento estará relacionado directamente con la geometría de la pieza, orientación de flujo y tipo de resina, es importante diseñar tanto la herramienta como la pieza plástica de manera adecuado para prevenir resultados dimensionales no esperados en el producto final (De Vos, 2016).
- ❖ Alabeo. Es la distorsión causada por los esfuerzos residuales internos, tanto térmicos (por las diferencias de temperaturas) como por las presiones de contacto aplicadas a la pieza. Es clave para impedirlo usar un buen calentamiento previo en el molde (De Vos, 2016).
- ❖ Parte Incompleta o Corta: Una velocidad de inyección demasiado baja, la obstrucción de la boquilla o la falta de material suficiente en la tolva pueden originar esta incidencia. Una solución sencilla es inyectar más material y/o aumentar la velocidad de inyección. También es posible arreglar la situación cambiando el molde a una máquina de mayor capacidad (De Vos, 2016).
- ❖ Quemaduras: Son manchas negras visibles a primera vista ocasionadas por diferentes motivos: uno de ellos es el quemado del aire comprimido dentro de la cavidad del molde. En ocasiones, si están alojados en el molde compuestos volátiles pueden descomponerse, es recomendable reducir su uso. Es aconsejable limitar la velocidad de inyección y colocar venteos en las zonas de las quemaduras (De Vos, 2016).
- ❖ Rebaba: Son excedentes de material no deseado en la parte plástica, pueden ser dados por un sellado incorrecto de los platos del molde, temperaturas más altas de lo requerido, sobre empaque en la segunda etapa de inyección, o incluso por la variación de tiempo de ciclo en un proceso semi automático (De Vos, 2016).

El moldeo por inyección de plástico demanda disponer de determinada cantidad de máquinas de moldeo de un tonelaje mínimo para el proceso productivo, y en algunas ocasiones, la capacidad instalada no es suficiente para satisfacer los requerimientos del cliente (De Vos, 2016).

Los ambientes de trabajo, sobre todo, donde hay sistemas de producción bajo pedido, presentan una diversa cantidad de trabajos con la opción de ser efectuados en diferentes centros de trabajo (CT), con la intención de asignar la mejor combinación posible, la velocidad, carga de máquina, eficiencia puede tener inferencia en los resultados de cada CT, para ello, son evaluados diferentes métodos de carga de máquinas (Jimenez, 2019).

2.2 Carga de máquinas

La programación de asignación de cargas consiste en acoplar a corto plazo (desde pocas horas hasta una semana) las órdenes de producción con las cargas de trabajo existentes en los departamentos. Una carga significa la asignación de tareas a CT específicos, máquinas o personas (Jimenez, 2019).

Las tareas llegan a estar programadas cuando están especificados los tiempos de iniciación y de terminación. Un CT es el área de una empresa en la cual los recursos productivos son organizados y el trabajo es llevado a cabo. El CT puede ser una máquina, un grupo de máquinas o un área en donde es realizado un tipo de trabajo específico (Jimenez, 2019).

Dentro de las cargas de trabajo pueden nombrarse 2 tipos:

- La "carga infinita" es presentada cuando la tarea es asignada a un CT sin considerar restricciones sobre la capacidad de los factores de producción (personal, máquinas, principalmente) y sobre la secuencia real de la tarea. Es utilizado por las grandes empresas con recursos económicos elevados (Jimenez, 2019).
- La "carga finita" consiste en programar realmente en detalle cada recurso utilizando el tiempo de preparación y de funcionamiento requerido para cada pedido. No son programadas más tareas de las correspondientes a su capacidad. Generalmente es utilizado por pequeñas y medianas empresas (Jimenez, 2019).

El diseño de la línea de producción a resolver nos da visión del método más factible a utilizar para la resolución de un problema, en este caso, analizamos el método húngaro o problema de asignación, método de índices y programación lineal (Jimenez, 2019).

2.2.1 Método húngaro o problemas de asignación.

En este caso, "x" cantidades de requerimientos son demandadas y existen "m" recursos para satisfacerse, este algoritmo cuenta con dos propiedades:

1. Si una constante es sustraída de todos los elementos de cualquier renglón o columna de la matriz de costos generada, los costos de las posibles soluciones son reducidos a las mismas constantes (Jimenez, 2019).
2. En un problema de asignación sin costos negativos, la solución óptima es una solución con un costo total de cero. El modelo de asignación también puede ser adaptado a problemas de maximización, problemas desbalanceados, asignaciones no permitidas y costos negativos (Jimenez, 2019).

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad Z &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (1) \\ \text{Sujeto a:} \quad \sum_{j=1}^n X_{ij} &= 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2) \\ \sum_{i=1}^m X_{ij} &= 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3) \\ X_{ij} &= 0, 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \text{ donde } m = n \quad (4) \end{aligned}$$

Figura 13. Forma matemática del modelo del método húngaro. Fuente: (Lieberman, 2010).

2.2.2 Método de índices

Este método no permite fraccionar los trabajos, y las diferencias en tiempo de las máquinas puede ser su antigüedad, construcción, capacidad, etc. Tres pasos básicos son distinguidos en este algoritmo:

- 1) Examinar cada trabajo de la lista y el tiempo requerido para cada uno, tomar los dos tiempos de producción más veloces (Jimenez, 2019).
- 2) Asignar los trabajos a las máquinas más eficiente con el caso de mayor diferencia, reducir las horas asignadas a la máquina (Jimenez, 2019).
- 3) Evaluar los trabajos restantes y de ser necesario, recalculan las diferencias tanto para reflejar los trabajos ya asignados para reflejar las horas disponibles de la máquina, las iteraciones deben ciclarse en el paso dos hasta agotar todos los trabajos (Jimenez, 2019).

Tabla 3. Ejemplo de método de índices. Fuente: (Lieberman, 2010).

Trabajo #	Máquinas:			
	A	B	C	D
1	10	25	12	18
2	5	18	6	12
3	8	15	8	10
4	12	20	14	14
5	20	35	25	27
6	15	30	19	23
7	14	20	14	16
8	17	27	19	25
9	8	30	10	16
10	9	25	12	18
Hrs. disponibles:	40	40	40	40

2.2.3 Programación lineal

El método de programación lineal permite a cada producto tener distintas maneras de ser producido, ya sean diversas rutas, fuentes, procesos, etc. Los costos unitarios totales y recursos requeridos dependerán de la ruta seleccionada. El método busca determinar cuánto de cada producto fabricar en cada proceso para minimizar los costos de producción, es una de las aplicaciones más comunes de programación matemática (Jimenez, 2019).

X_{ij} = cantidad de producto i ($i=1, 2, \dots, n$) fabricada por el proceso j ($j=1, 2, \dots, J_i$)
 D_i = producción requerida de producto i en el periodo
 b_k = cantidad de recurso k ($k=1, 2, \dots, K$) disponible en el periodo
 a_{ijk} = número de unidades de recurso k usadas para producir una unidad de producto i en el proceso j
 c_{ij} = costo variable unitario de producir una unidad de producto i en proceso j
 Z = costo total de producción en el periodo

El problema:

$$\text{Mín.} \quad Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} c_{ij} X_{ij} \quad (5)$$

$$\text{Sujeto a:} \quad \sum_{j=1}^{J_i} X_{ij} = D_i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} a_{ijk} X_{ij} \leq b_k \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} X_{ij} \geq 0 \quad \text{para toda } i \text{ y } j \quad (8)$$

Figura 14. Modelo matemático para el método de programación lineal. Fuente: (Lieberman, 2010).

Los diferentes diseños de moldes de moldeo por inyección de plástico para reducir los incidentes de calidad en algún producto, y la limitante de no tener la capacidad instalada disponible para producir ciertos modelos en determinados CT, dan lugar a una problemática a resolver relacionada con estos dos temas: reducción de incidentes de calidad y liberación de capacidad instalada en CT (Jimenez, 2019).

Capítulo 3. Definición del problema

3.1 Planteamiento y justificación del problema

La problemática principal para resolver es referente a la fabricación del producto 2610013854 con descripción “Nose Cap”, compuesto de tres materiales y producido mediante dos operaciones:

- i. El proceso de inserción manual
- ii. El proceso de doble tiro

Ambos procesos desarrollados en máquinas de moldeo eléctricas marca Toshiba modelo EC100S-2Y.

El producto tiene una demanda aproximada de 2,500,000 de unidades anuales, y para cumplir con tal demanda es necesario el uso de seis centros de trabajo, bajo capacidades de producción similares operando en paralelo, lo cual representa un uso de capacidad instalada del 65% anual de estos centros de trabajo, limitando la producción de otros modelos por falta de liberación de capacidad instalada.

El tiempo de ciclo actual para producir una unidad de este producto es 55 segundos, considerando dos operaciones requeridas, el diseño de este producto, desglosando sus diferentes materiales, y un esquemático del proceso productivo están ilustrados en las figuras 15 y 16 respectivamente.



Figura 15. Diseño tridimensional de producto 2610013854. Fuente: (Robert Bosch GmbH, 2012).

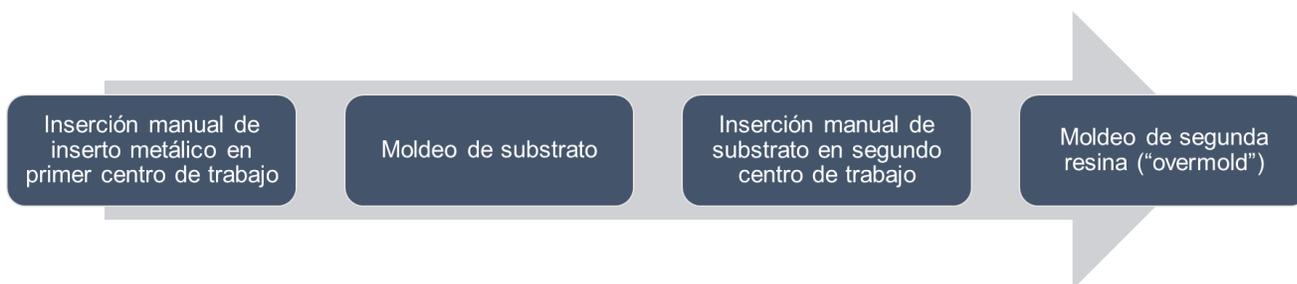


Figura 16. Proceso descriptivo para producción de PN 2610013854. Fuente: Elaboración propia.

Además de ser un problema referente al uso de capacidad instalada, el diseño actual de estos herramientas y método de uso son una de las causas principales de altos niveles de desperdicio de piezas plásticas en la compañía, durante los años 2018 y 2019 fueron rechazadas alrededor de 133,000 piezas de 2,500,000, es decir, el 5.32% (Base de datos ERP-IQMS de Formula Plastics, 2018), y existieron cinco quejas de cliente por problemas de calidad estéticos en el producto.

Las figuras 17 y 18 muestran dos gráficos de primer y segundo nivel, donde ilustran los modos de falla y causas principales de estos incidentes de calidad.

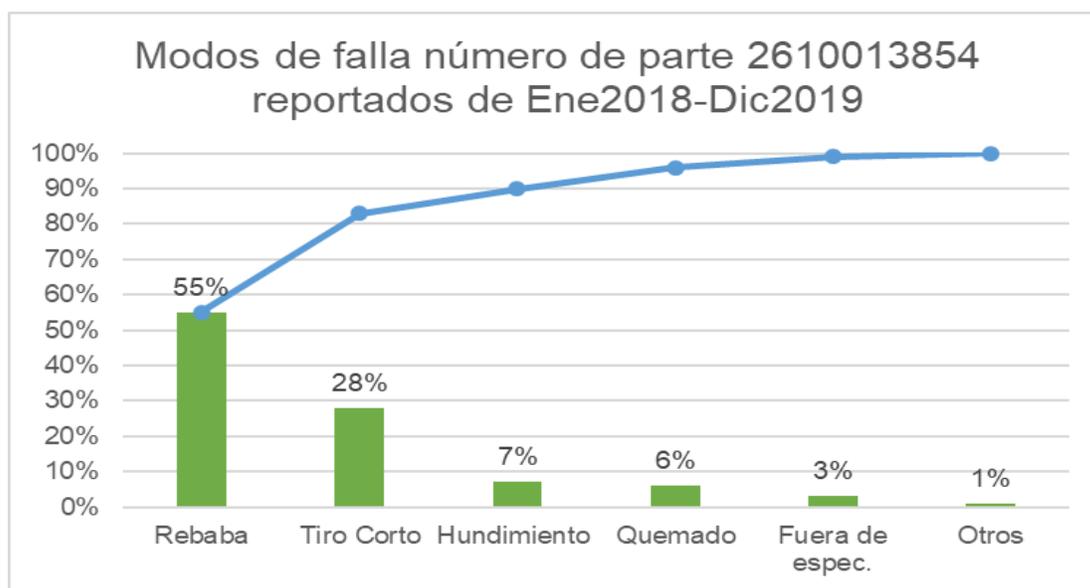


Figura 17. Modos de falla en número de parte 2610013854 reportados de enero 2018 a diciembre 2019. Fuente: Elaboración propia.

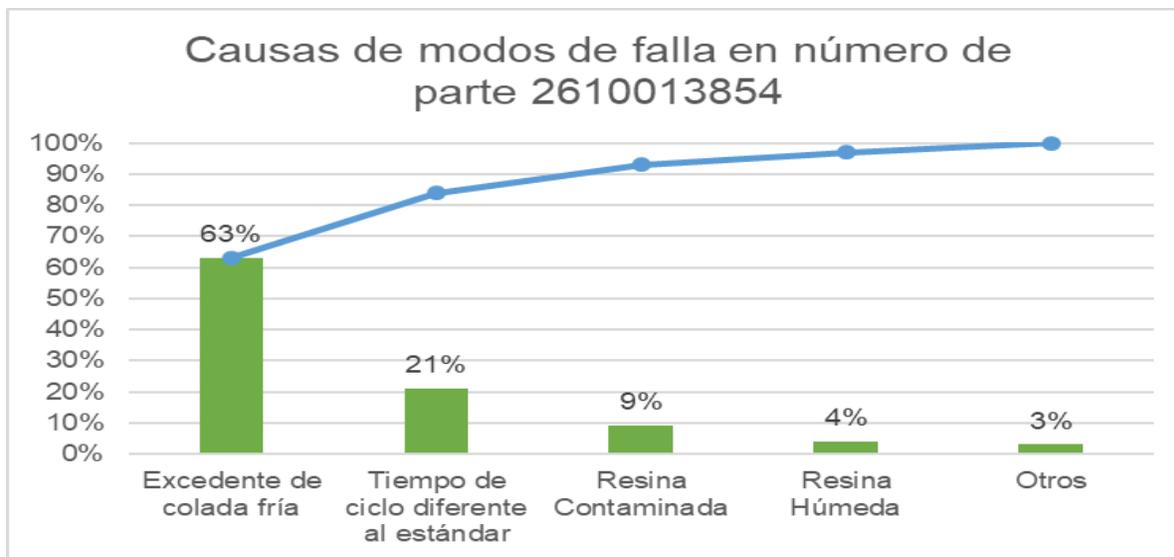


Figura 18. Causas de modos de falla en número de parte 2610013854 reportados de enero 2018 a diciembre 2019. Fuente: Elaboración propia.

El análisis anterior pretende responder la siguiente pregunta de investigación: ¿qué diseño de molde reduce las fallas estéticas y libera capacidad instalada de las máquinas de moldeo?

3.2 Hipótesis nula y alternativa

H0: Un molde de colada caliente, de ocho cavidades, de inserción y doble tiro con motor de desenroscado activado por motor hidráulico, no reduce las fallas de calidad y no libera la capacidad instalada de máquinas de moldeo, mínimamente el 80% y 33% respectivamente en el producto 2610013854.

H1: Un molde de colada caliente, de ocho cavidades, de inserción y doble tiro con motor de desenroscado activado por motor hidráulico, reduce las fallas de calidad y libera la capacidad instalada de máquinas de moldeo, mínimamente 80% y 33% respectivamente en el producto 2610013854.

3.3 Objetivos generales y específicos

- Liberar por lo menos 33% de la capacidad instalada de máquinas de moldeo por inyección asignadas a la producción del producto 2610013854.
- Reducir por lo menos 80% de fallos de calidad en defectos estéticos del producto 2610013854.

- Obtener un índice de capacidad de proceso igual o mayor a 1.33 en todas las variables críticas del producto.

Los datos mencionados en los capítulos 2 y 3, permiten desarrollar una metodología para la solución del problema en cuestión, utilizando como base el estado del arte de moldes de inyección de plástico, y un método matemático para resolver el problema de carga de máquinas.

Capítulo 4. Metodología

La metodología partió de una investigación documental para identificar la tecnología de moldeo por inyección, el comportamiento de la calidad del producto utilizando el molde existente de colada fría, mediante recopilación de datos históricos de la base de datos “DPPMs and Customer Complaints 2018-2019” de Formula Plastics, seguida de una investigación de campo para evaluar el desempeño del nuevo diseño del molde, bajo la distribución de carga de máquinas preestablecida, y el porcentaje de capacidad instalada liberado posterior a la implementación.

El diseño para validar el desempeño del nuevo herramental fue:

- 1) Evaluar mediante un DFM el rediseño.
- 2) Evaluar mediante un reporte de simulación de flujo, el funcionamiento de la herramienta durante el proceso de moldeo de inyección, para asegurar el comportamiento del proceso y producto deseado.
- 3) Desarrollar una ventana de parámetros críticos del proceso de moldeo, mediante la metodología de Moldeo Científico (RJG Inc, 1999).
- 4) Determinar un tamaño de muestra para validar la implementación del nuevo herramental.
- 5) Desarrollar protocolos y reportes de validación de instalación (IQ), operación (OQ) y desempeño (PQ) de acuerdo con la norma ISO 143485 utilizando los valores nominales de la ventana de parámetros críticos obtenida durante el Moldeo Científico.
- 6) Diseñar y realizar un Diseño de Experimentos para la validación de variables y atributos críticos del producto final.
- 7) Solución de carga de máquinas para liberación parcial de capacidad instalada.



Fig. 19. Flujo de desarrollo de metodología. Fuente: Elaboración propia.

4.1 Estudio de Diseño Para Manufactura para rediseño de molde nuevo.

La resina utilizada con el molde para producir el producto es evaluada en los aspectos de encogimiento y factor de tonelaje por pulgada cuadrada, para determinar el tonelaje requerido la máquina de moldeo.

Los ángulos de desmoldeo en la pieza también son evaluados en esta sección, para asegurar la expulsión automática de las piezas después de moldearse.

El espesor típico de pared del producto es evaluado para asegurar cero defectos en el producto en cuanto a piezas cortas, marcas de hundimiento, líneas de unión, entre otras.

El método para remover la colada de la pieza es evaluado para determinar cuál es el más apropiado en cuanto a tiempo y equipo auxiliar.

La mecánica general del molde es evaluada en el estudio DFM, en conjunto con las posibles líneas de unión en el producto, directamente relacionado con el número de compuertas para inyección en la pieza.

El acabado de las superficies de la pieza es confirmado en este punto, así como el tipo de grabado presenta en el producto, normalmente las especificaciones del producto de plástico moldeados por inyección especifican el material, símbolo de reciclado, fecha de producción y número de cavidad grabados en la pieza.

4.2 Análisis de simulación de flujo para rediseño de molde nuevo.

El Análisis de Simulación de Flujo será desarrollado con apoyo del Software SolidWorks módulo de Plásticos. El estudio asegurará determinar los siguientes parámetros y la prevención de los siguientes posibles modos de falla:

- ✓ Tiempo de llenado de cavidades
- ✓ Temperatura en el flujo frontal de la pieza
- ✓ Presión máxima en la conmutación de velocidad y presión
- ✓ Presión mínima de inyección requerida
- ✓ Fuerza de cierre mínima requerida por el molde
- ✓ Identificar y descartar el posible riesgo de presentar rebaba en el producto debido a las líneas de soldadura y de partición
- ✓ Determinar el tiempo máximo de congelamiento de la compuerta, esto para garantizar el peso constante de las piezas entre cada ciclo

- ✓ Encogimiento volumétrico al expulsar la pieza del molde, para determinar las dimensiones finales del producto
- ✓ Deflexión del producto después de ser moldeado

La ventana de parámetros críticos de proceso será determinada con base en la metodología de Moldeo Científico, para después determinar un tamaño de muestra para validar el proceso y el producto.

4.3 Determinación de tamaño de muestra

El tamaño de muestra será determinado considerando un 95% de confianza y 95% de confiabilidad, y un tamaño de población de 576 piezas (resultante de una corrida de 120 minutos con un tiempo de ciclo igual a 25 segundos) mediante la siguiente ecuación (niveles de confianza y confiabilidad establecidos mediante el Análisis de Modo y Efecto de Falla del Molde Y1967, base de datos Formula Plastics):

$$n = \frac{\text{Ln}(1 - \text{nivel de confianza})}{\text{Ln}(\text{confiabilidad})} \quad (9)$$

Fuente: (Dovich, 1990)

Donde:

- Ln = Logaritmo Natural
- n = tamaño de muestra
- Nivel de confianza = Nivel de confianza obtenido de Análisis de Modo y Efecto de Falla molde Y1967
- Nivel de confiabilidad = Nivel de confiabilidad obtenido de Análisis de Modo y Efecto de Falla molde Y1967

La muestra determinada con base en la ecuación (9), será utilizada finalmente para el desarrollo de un diseño de experimentos, con apoyo del Software Minitab, es importante mencionar el tamaño de muestra a evaluar por cavidad, en este caso, el molde será de 8 cavidades, entonces el número de piezas final a inspeccionar será el tamaño de muestra determinado por la ecuación (9) multiplicado por 8.

4.4 Diseño y desarrollo de Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos será desarrollado mediante un diseño factorial 3^3 , tomando en cuenta 3 tratamientos (parámetros críticos de proceso: tiempo de llenado, de enfriamiento y presión de primera etapa), 3 niveles, y 8 corridas. (Montgomery, 2012).

Tabla 4. Diseño factorial de experimento a desarrollar. Fuente: Elaboración propia.

Presión	Tiempo de enfriamiento		Tiempo de enfriamiento	
	TE1		TE2	
	Tiempo de llenado		Tiempo de llenado	
	TL1	TL2	TL1	TL2
P1				
P2				

El Diseño de Experimentos será desarrollado para determinar los valores de parámetros críticos del proceso ideales, así como la interacción entre ellos, y también identificará los factores estadísticamente significativos e insignificantes en la variable de salida.

El método de carga de máquinas será desarrollado para identificar el porcentaje de diferencia de capacidad instalada antes y después de la implementación el nuevo herramental.

4.5 Método para solucionar el problema de cargas de máquina para liberación de capacidad instalada.

El método aplicable para el problema de cargas de máquina, de acuerdo con lo mencionado en el capítulo 2, es:

- 1) Método Húngaro. Existen dos comparaciones a realizar con este método, en el primer caso, seis centros de trabajo están disponibles para producir 2,500,000 de requerimientos, en el segundo, solamente existe un centro de trabajo disponible para satisfacer los mismos requerimientos del primer caso, el problema de asignación consiste en encontrar la combinación de recursos ideal para maximizar la utilidad total reduciendo el costo total.

Tabla 5. Planteamiento del problema de asignación previo a la implementación de carga de máquinas. Fuente: Elaboración propia.

Job/WC	M301	M302	M303	M304	M305	M306
PO 19001						
PO 19002						
PO 19003						
PO 19004						
PO 19005						
PO 19006						

Tabla 6. Planteamiento del problema de asignación posterior a la implementación de carga de máquinas. Fuente: Elaboración propia.

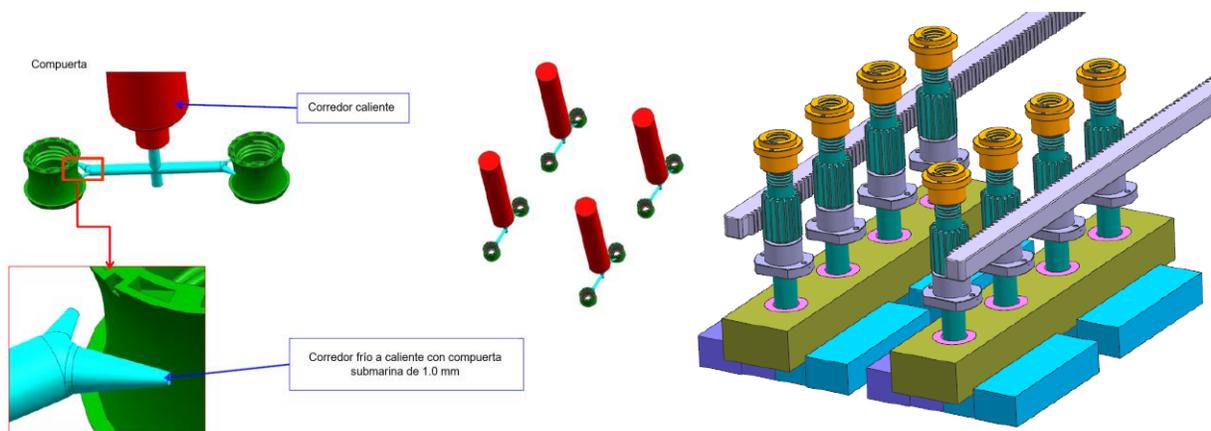
Job/WC	M205
PO 19001	
PO 19002	
PO 19003	
PO 19004	
PO 19005	
PO 19006	

Capítulo 5. Resultados

5.1 Diseño para Manufactura y Ensamble de molde

Los resultados fueron obtenidos mediante una evaluación del desempeño del nuevo diseño del molde, bajo una distribución de carga de máquinas preestablecida.

Las figuras 21 y 21 muestran los resultados del DfMA del molde nuevo, principalmente el sistema de corredor caliente nuevo, orientación mecánica de apertura y cierre del molde, orientación del motor de desenroscado mecánico automatizado, y movimiento de los deslizadores en el mismo.



Estructura del molde

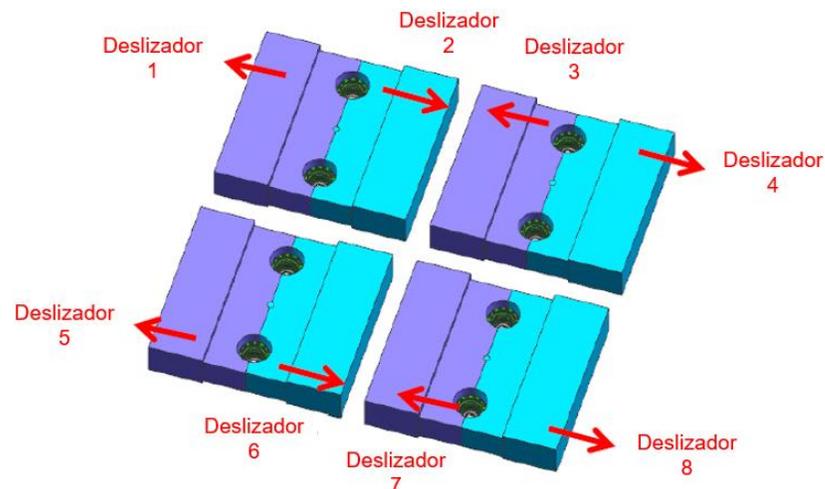


Fig. 20. Esquema de Diseño para Manufactura y Ensamble de molde nuevo. Fuente. Elaboración propia.

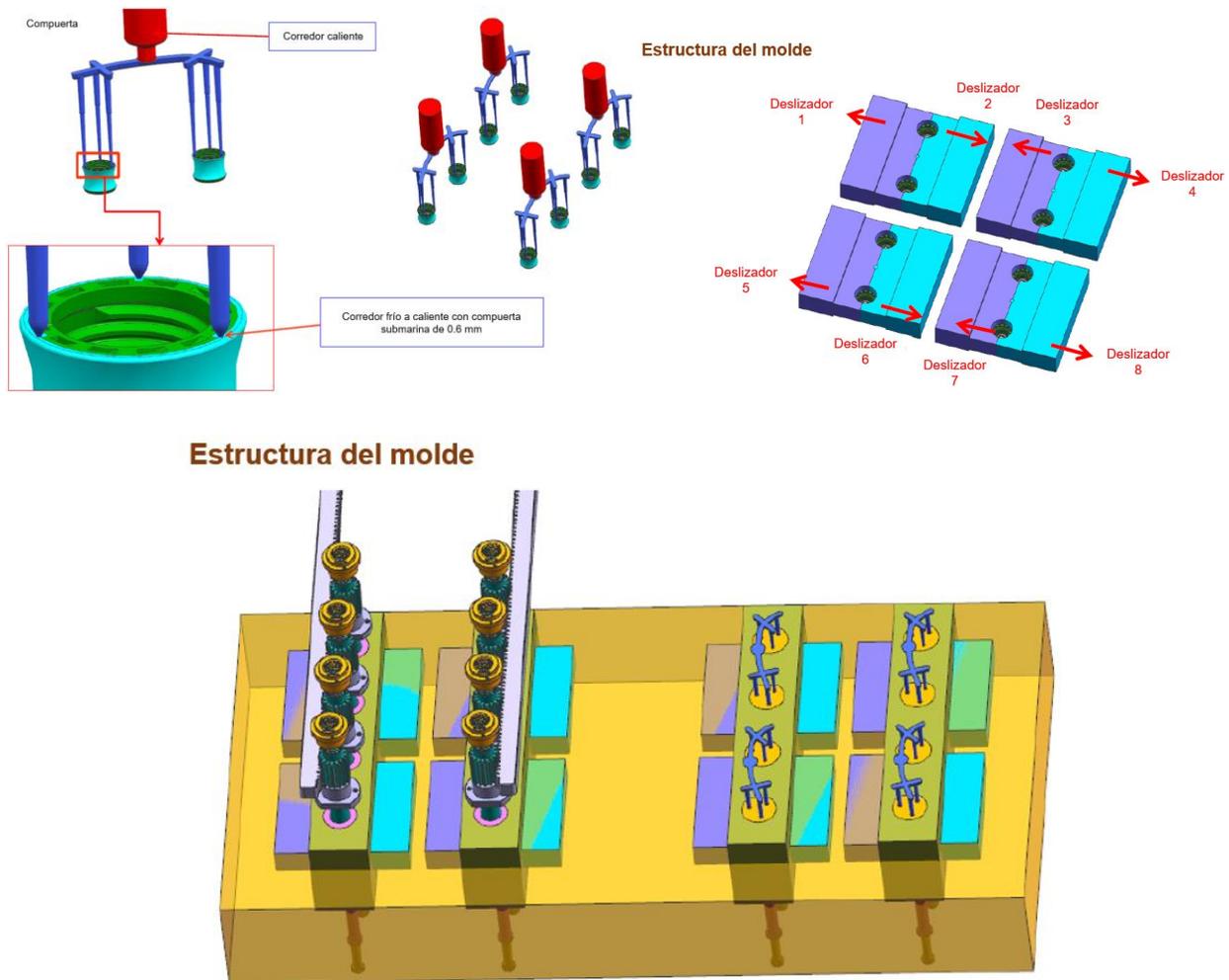


Fig. 21. Esquema de Diseño para Manufactura y Ensamble de molde nuevo. Fuente. Elaboración propia.

5.2 Determinación de tamaño de muestra para la validación del nuevo molde

El tamaño de muestra para la validación del molde nuevo fue obtenido mediante la ecuación (9) utilizando niveles de 0.95 de confiabilidad y confianza, dichos porcentajes determinados de un Análisis de Modo y Efecto de Falla de Diseño del nuevo molde, al resultar el Número de Prioridad de Riesgo (RPN por sus siglas en inglés) mayor a 80 deben considerarse porcentajes de mínimo 95%. El tamaño de muestra considerado corresponde a cada cavidad del molde individualmente, en este caso, un molde de ocho cavidades.

$$(9) \quad n = \frac{\text{Ln}(1-\text{nivel de confianza})}{\text{Ln}(\text{confiabilidad})} = \frac{\text{Ln}(1-0.95)}{\text{Ln}(0.95)} = \frac{\text{Ln}(0.05)}{\text{Ln}(0.95)} = 58.4 \approx 59 \text{ muestras}$$

5.3 Desarrollo de protocolos de validación y ventana de parámetros críticos de proceso.

La ventana de parámetros de proceso críticos de moldeo será basada en la hoja de datos técnicos de la resina Ultramid HPN 9233G BK5830 Polyamide 6 (BASF, 2014), tomando en cuenta el rango de temperatura especificado en la sección de condiciones típicas.

Tabla 7. Método de validación de parámetros críticos de proceso de molde mediante Calificación de Operación basado en norma ISO 13485. Fuente: Elaboración propia.

Validación	Item	Criterio de aceptación	Tamaño de muestra
2 horas equivalentes a 288 piezas por cavidad evaluadas en parámetros nominales de proceso	Inspección visual y de atributos	De acuerdo con la especificación del producto definida por el cliente	59 muestras por corrida
	Dimensiones críticas: Diámetro (\varnothing) de 16.52 mm Tolerancia +/-0.20 mm	Índice de capacidad de proceso igual o mayor a 1.33 ($C_{pk} \geq 1.33$) definido por el cliente	59 muestras por corrida

5.4 Diseño de experimentos para validación del molde nuevo

El diseño de experimentos efectuado para la validación del molde nuevo consistió en tres tratamientos, dos niveles y ocho réplicas, basado en la información de la tabla 7, evaluando como variable de salida el diámetro crítico del producto de 16.52 +/- 0.20 mm ilustrado en la figura 22, finalmente ilustrando el diseño de experimentos resultante en la tabla 8.

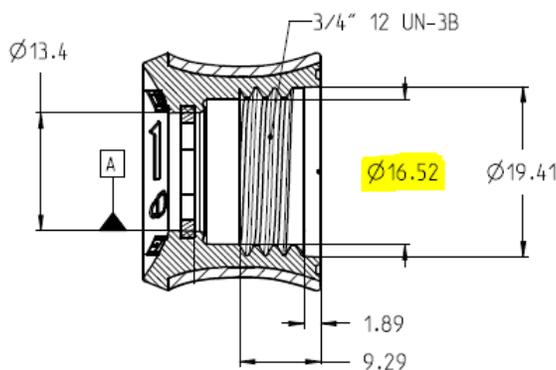


Fig. 22. Diseño bidimensional del producto 2610013854 ilustrando dimensión crítica. Fuente: (Robert Bosch GmbH, 2012).

Tabla 8. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 1. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad 1 del molde	Temperatura de la masa (°C)	Temperatura del molde (80°C)		Temperatura del molde (95°C)	
		Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)	Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)
	270°C	16.40	16.41	16.40	16.11
16.35		16.32	16.34	16.15	
16.49		16.39	16.31	16.12	
16.48		16.30	16.30	16.19	
16.49		16.31	16.29	16.17	
16.41		16.22	16.28	16.18	
16.32		16.15	16.29	16.13	
295°C	16.27	16.20	16.35	16.15	
	16.98	17.00	16.57	16.78	
	16.99	17.10	16.55	16.79	
	16.91	17.05	16.57	16.78	
	16.87	17.02	16.55	16.75	
	16.86	17.05	16.54	16.80	
	16.81	17.09	16.49	16.81	
	16.95	17.08	16.51	16.70	
16.96	17.03	16.53	16.71		

NOTA: Todos los resultados están en milímetros.

Tabla 9. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 2. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad 2 del molde	Temperatura de la masa (°C)	Temperatura del molde (80°C)		Temperatura del molde (95°C)	
		Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)	Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)
	270°C	16.41	16.41	16.41	16.05
16.31		16.31	16.39	16.08	
16.29		16.39	16.35	16.01	
16.25		16.35	16.31	16.11	
16.21		16.37	16.39	16.08	
16.28		16.30	16.37	16.09	
16.29		16.31	16.32	16.07	
16.30		16.32	16.31	16.08	
295°C	16.80	17.20	16.49	16.81	
	16.70	17.12	16.51	16.85	
	16.75	17.15	16.52	16.89	
	16.80	17.16	16.52	16.97	
	16.94	17.18	16.55	16.85	
	16.91	17.17	16.53	16.81	
	16.87	17.19	16.58	16.92	
	16.85	17.11	16.60	16.92	

NOTA: Todos los resultados están en milímetros.

Tabla 10. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 3. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad 3 del molde	Temperatura de la masa (°C)	Temperatura del molde (80°C)		Temperatura del molde (95°C)	
		Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)	Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)
	270°C	16.41	16.32	16.49	16.00
16.35		16.31	16.41	16.11	
16.41		16.35	16.32	16.12	
16.48		16.35	16.38	16.14	
16.49		16.31	16.31	16.15	
16.47		16.22	16.30	16.18	
16.41		16.15	16.35	16.10	
16.41		16.19	16.33	16.11	
295°C	16.97	17.05	16.51	16.89	
	16.91	17.05	16.47	16.96	
	16.99	17.04	16.49	16.87	
	16.98	17.01	16.58	16.78	
	16.91	17.02	16.54	16.80	
	16.89	17.05	16.51	16.87	
	16.78	17.00	16.53	16.89	
	16.79	17.08	16.59	16.85	

NOTA: Todos los resultados están en milímetros.

Tabla 11. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 4. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad 4 del molde	Temperatura de la masa (°C)	Temperatura del molde (80°C)		Temperatura del molde (95°C)	
		Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)	Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)
	270°C	16.38	16.15	16.31	16.05
16.33		16.13	16.29	16.11	
16.34		16.19	16.36	16.12	
16.31		16.21	16.38	16.15	
16.29		16.25	16.31	16.13	
16.35		16.21	16.39	16.18	
16.38		16.11	16.31	16.19	
16.33		16.05	16.28	16.10	
295°C	16.99	17.11	16.47	16.95	
	16.87	17.18	16.46	16.95	
	16.89	17.19	16.58	16.98	
	16.88	17.11	16.55	16.99	
	16.87	17.15	16.53	16.92	
	16.89	17.16	16.51	16.91	
	16.90	17.19	16.53	16.00	
	16.78	17.18	16.51	16.89	

NOTA: Todos los resultados están en milímetros.

Tabla 12. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 5. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad 5 del molde	Temperatura de la masa (°C)	Temperatura del molde (80°C)		Temperatura del molde (95°C)	
		Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)	Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)
	270°C	16.31	16.39	16.15	16.05
16.35		16.38	16.18	16.01	
16.31		16.38	16.14	16.08	
16.38		16.31	16.19	16.09	
16.39		16.35	16.11	16.08	
16.31		16.39	16.12	16.07	
16.29		16.31	16.05	16.09	
16.22		16.32	16.08	16.08	
295°C	16.99	17.15	16.50	16.77	
	16.87	17.19	16.54	16.75	
	16.91	17.18	16.57	16.70	
	16.97	17.11	16.52	16.69	
	16.96	17.10	16.52	16.79	
	16.92	17.15	16.54	16.80	
	16.90	17.19	16.52	16.85	
	16.89	17.08	16.53	16.75	

NOTA: Todos los resultados están en milímetros.

Tabla 13. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 6. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad 6 del molde	Temperatura de la masa (°C)	Temperatura del molde (80°C)		Temperatura del molde (95°C)	
		Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)	Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)
	270°C	16.15	16.38	16.19	16.00
16.22		16.37	16.11	15.90	
16.18		16.31	16.18	15.87	
16.19		16.32	16.12	15.98	
16.17		16.29	16.05	15.98	
16.18		16.28	16.07	15.96	
16.15		16.29	16.08	15.97	
16.11		16.25	16.03	15.99	
295°C	16.98	17.00	16.59	16.85	
	16.96	16.90	16.58	16.81	
	16.89	16.85	16.54	16.89	
	16.91	16.89	16.58	16.87	
	16.98	16.95	16.57	16.88	
	16.87	16.99	16.56	16.81	
	16.86	16.89	16.55	16.89	
	16.89	16.85	16.57	16.91	

NOTA: Todos los resultados están en milímetros.

Tabla 14. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 7. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad 7 del molde	Temperatura de la masa (°C)	Temperatura del molde (80°C)		Temperatura del molde (95°C)	
		Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)	Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)
	270°C	16.05	16.31	16.21	16.11
16.11		16.30	16.25	16.05	
16.09		16.30	16.29	16.09	
16.08		16.38	16.15	16.08	
16.11		16.21	16.18	16.05	
16.19		16.28	16.17	16.01	
16.20		16.22	16.18	16.08	
16.18		16.29	16.13	16.18	
295°C	16.99	17.11	16.54	16.95	
	16.91	17.15	16.58	16.93	
	16.81	17.08	16.59	16.99	
	16.92	17.05	16.52	16.91	
	16.93	17.04	16.53	16.92	
	16.99	17.03	16.54	16.95	
	16.91	17.09	16.59	16.97	
	16.87	17.12	16.54	16.94	

NOTA: Todos los resultados están en milímetros.

Tabla 15. Respuestas de variable de salida de diseño de experimentos para validación del molde nuevo cavidad 8. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad 8 del molde	Temperatura de la masa (°C)	Temperatura del molde (80°C)		Temperatura del molde (95°C)	
		Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)	Presión de inyección y empaque (35 Bar)	Presión de inyección y empaque (125 Bar)
	270°C	16.15	16.32	16.25	16.05
16.21		16.21	16.26	16.09	
16.18		16.15	16.21	16.10	
16.19		16.19	16.29	16.15	
16.17		16.17	16.27	16.11	
16.11		16.18	16.23	16.10	
16.05		16.11	16.21	16.09	
16.09		16.21	16.19	16.08	
295°C	16.95	16.99	16.57	16.91	
	17.11	16.98	16.51	16.87	
	17.05	16.91	16.59	16.82	
	17.03	16.92	16.58	16.89	
	17.08	16.93	16.53	16.81	
	17.05	16.99	16.58	16.85	
	17.02	17.00	16.59	16.79	
	17.04	17.20	16.50	16.78	

NOTA: Todos los resultados están en milímetros.

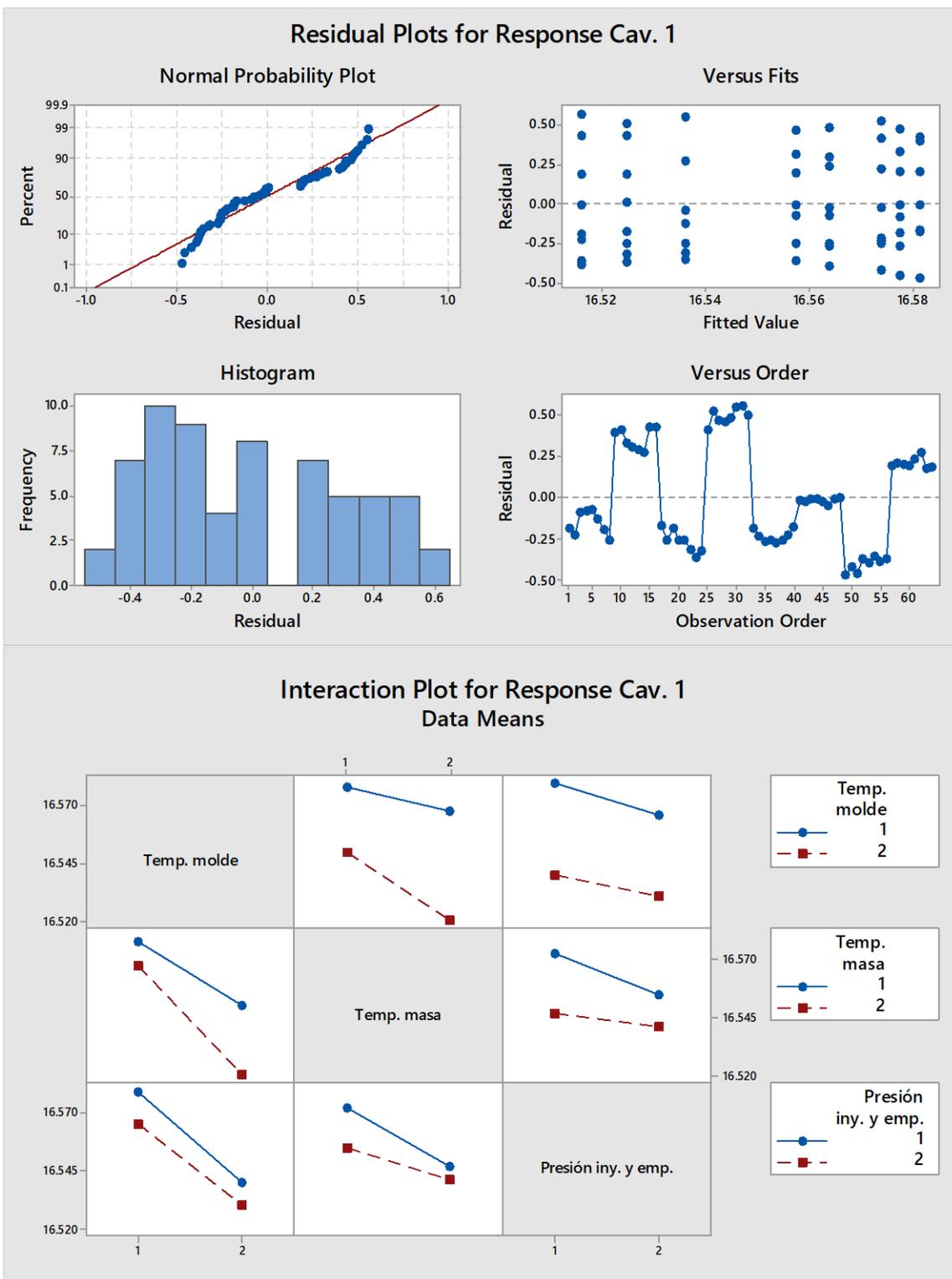


Fig. 23. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 1. Fuente: Elaboración propia.

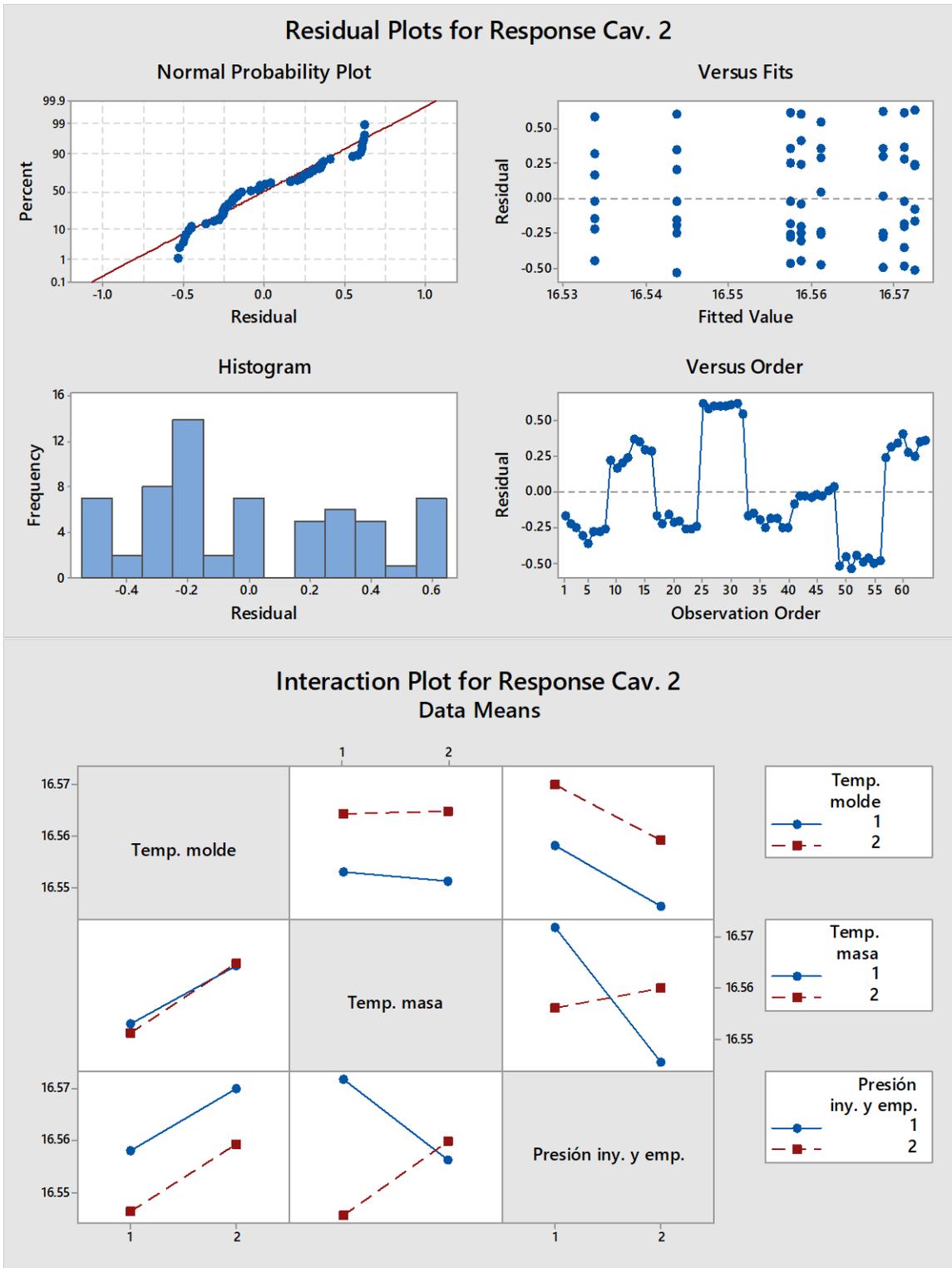


Fig. 24. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 2. Fuente: Elaboración propia.

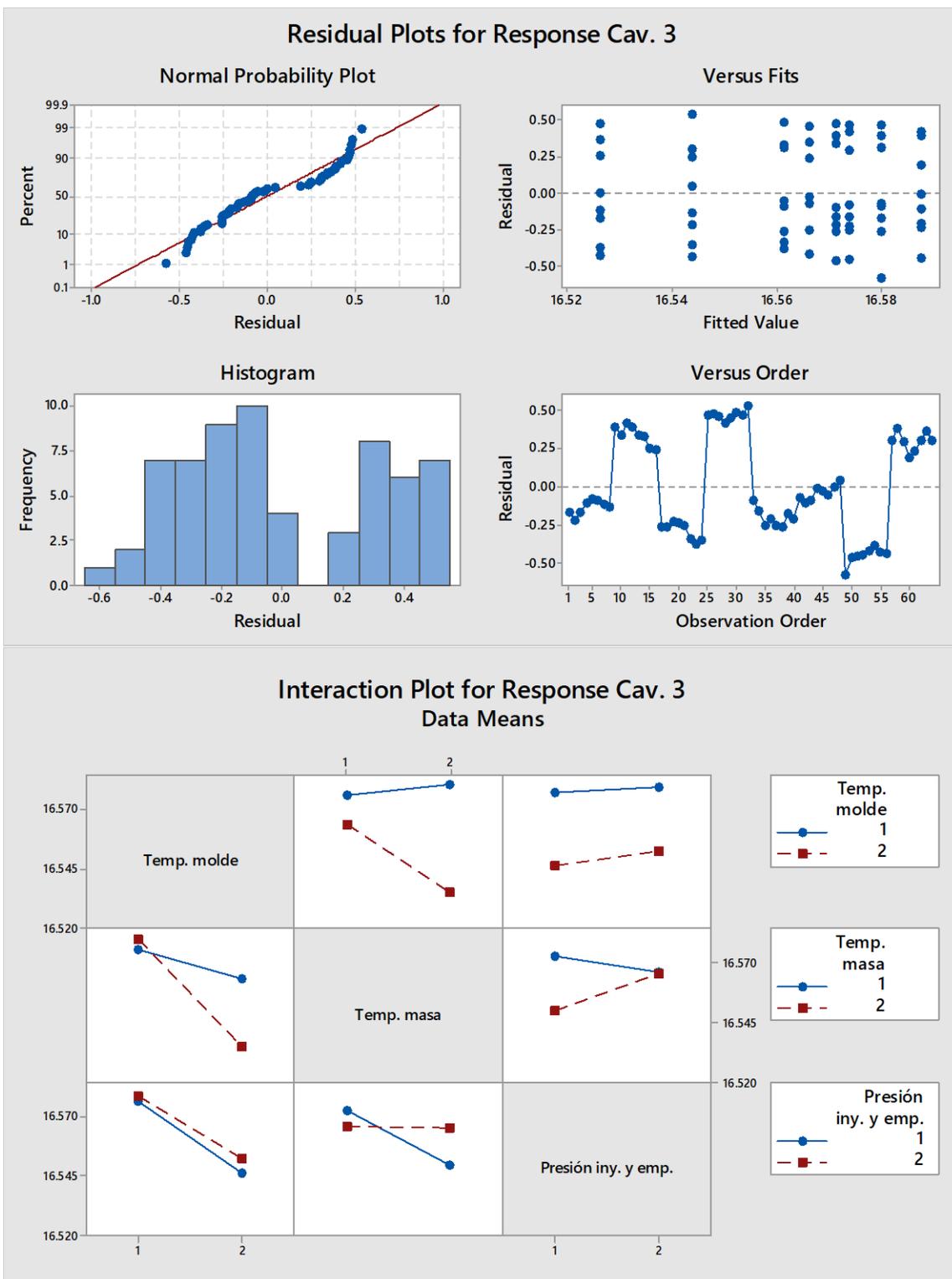


Fig. 25. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 3. Fuente: Elaboración propia.

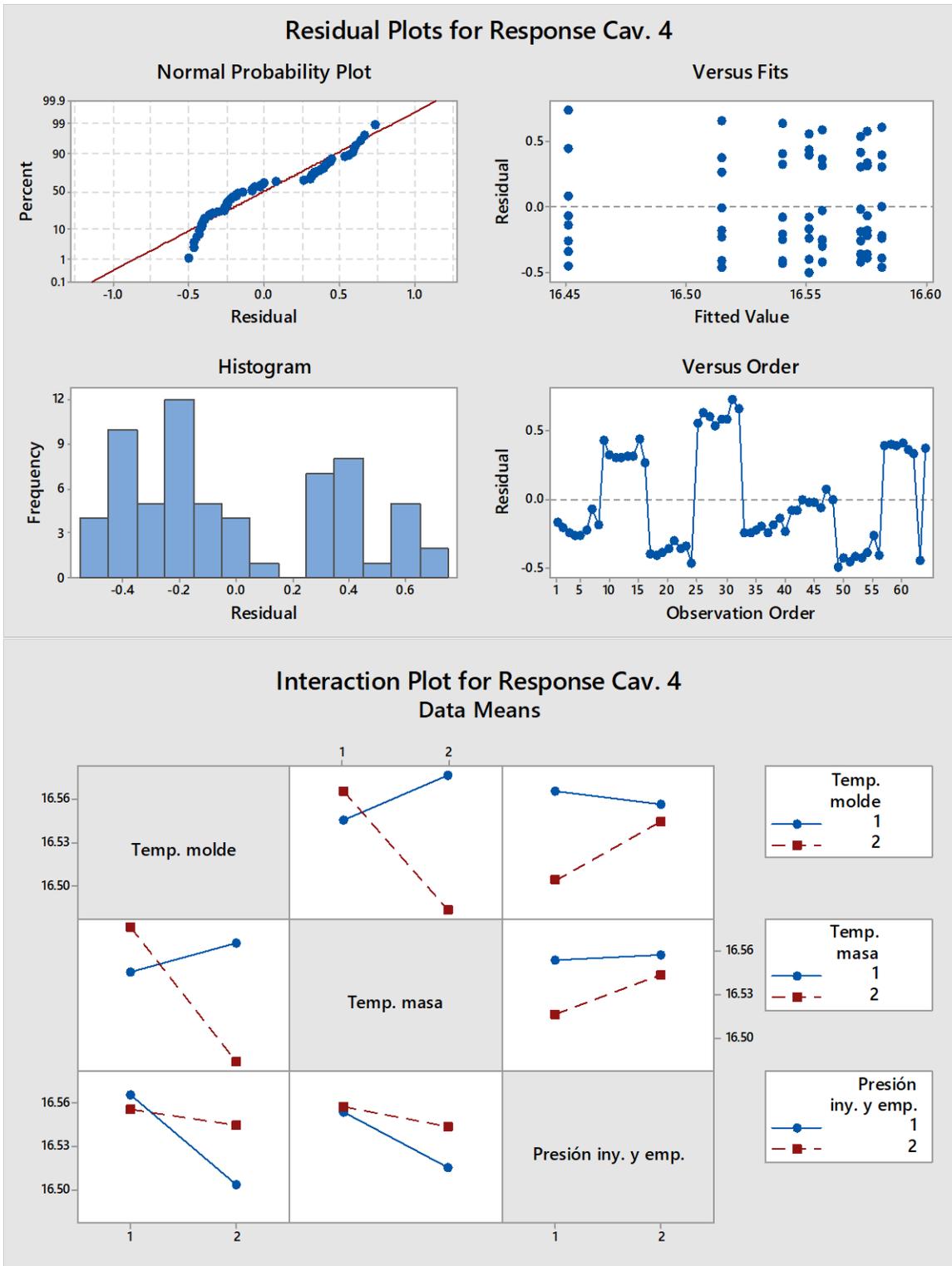


Fig. 26. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 4. Fuente: Elaboración propia.

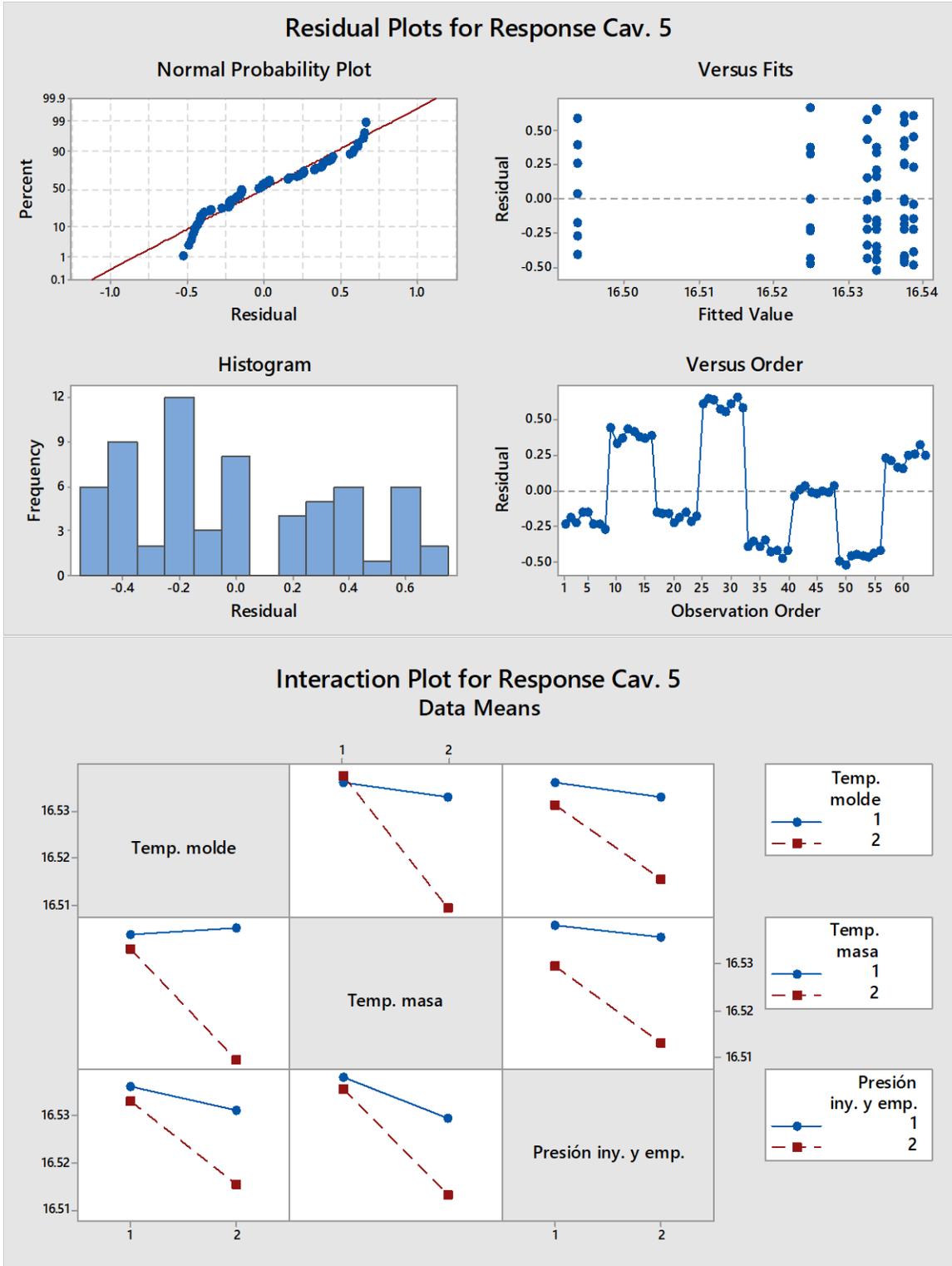


Fig. 27. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 5. Fuente: Elaboración propia.

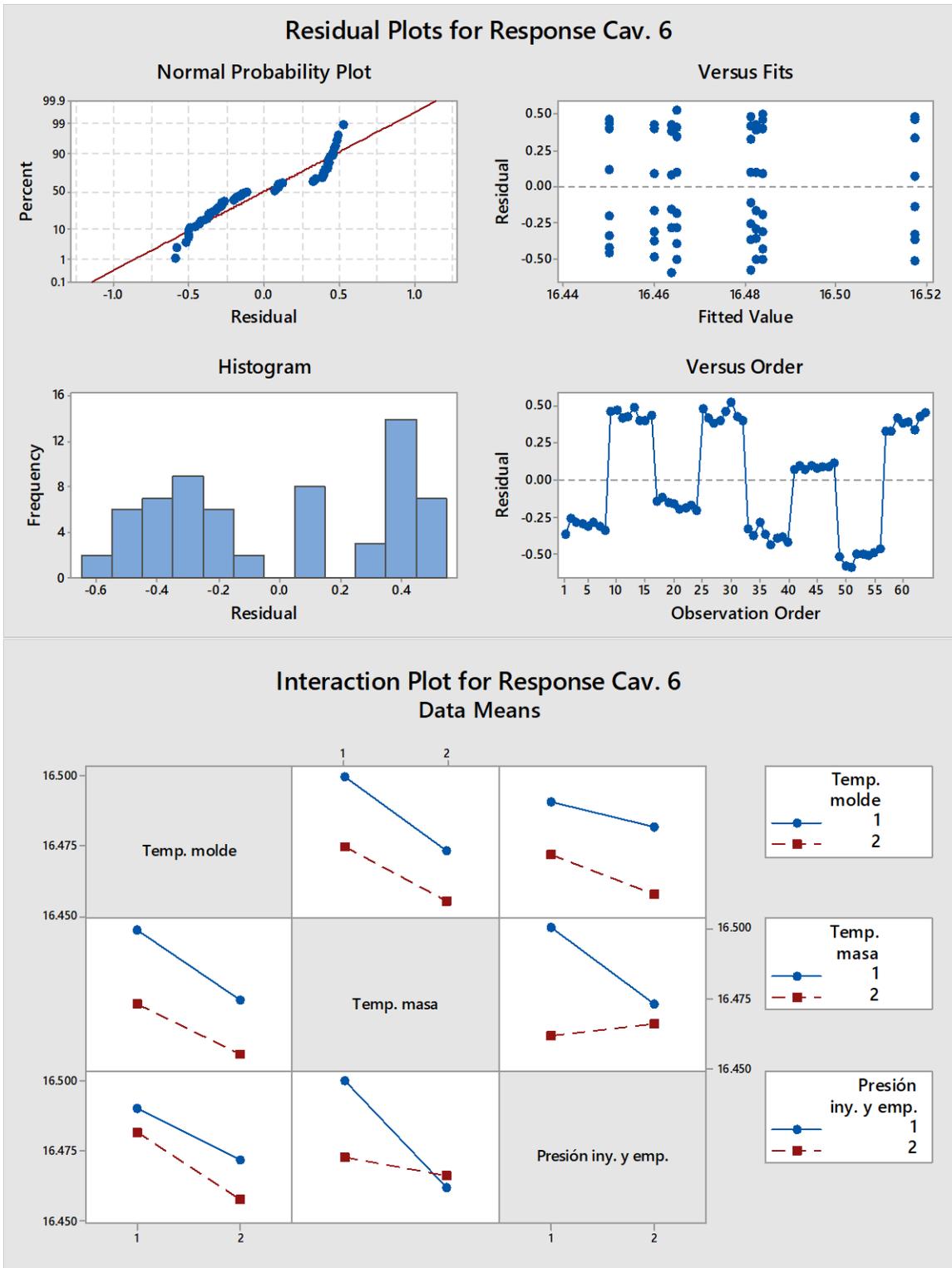


Fig. 28. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 6. Fuente: Elaboración propia.

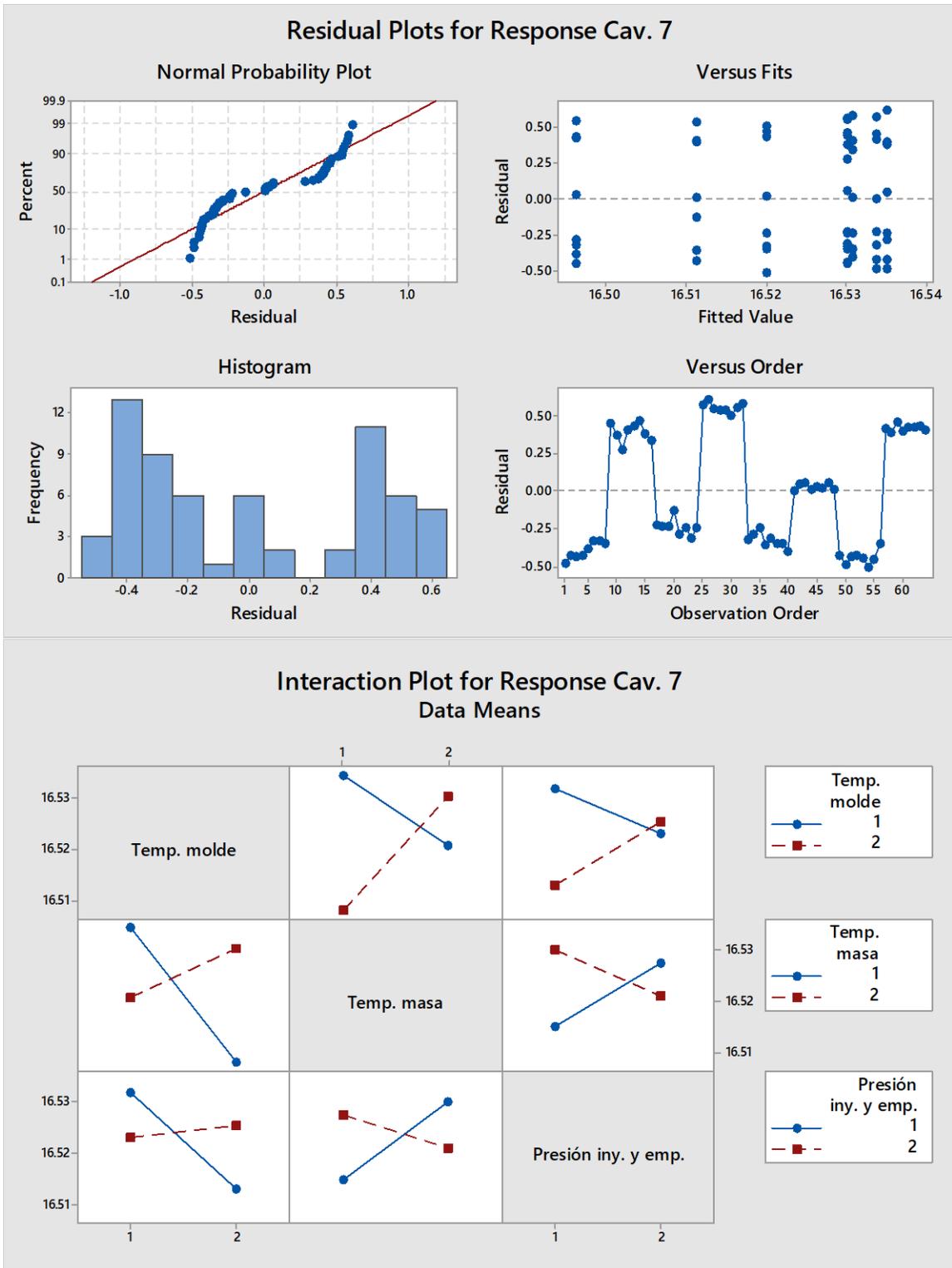


Fig. 29. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 7. Fuente: Elaboración propia.

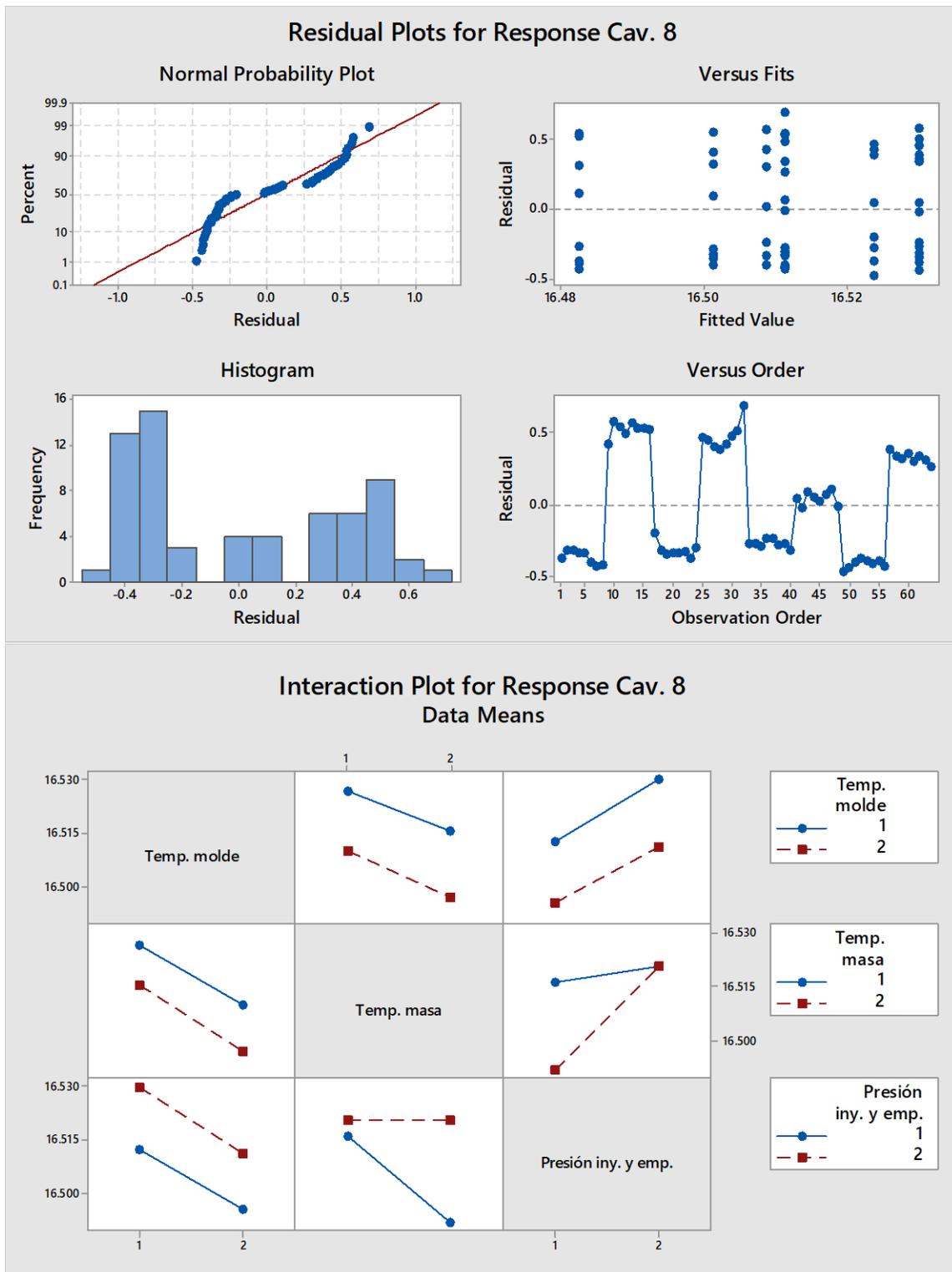


Fig. 30. Análisis de diseño de experimentos factorial cavidad 8. Fuente: Elaboración propia.

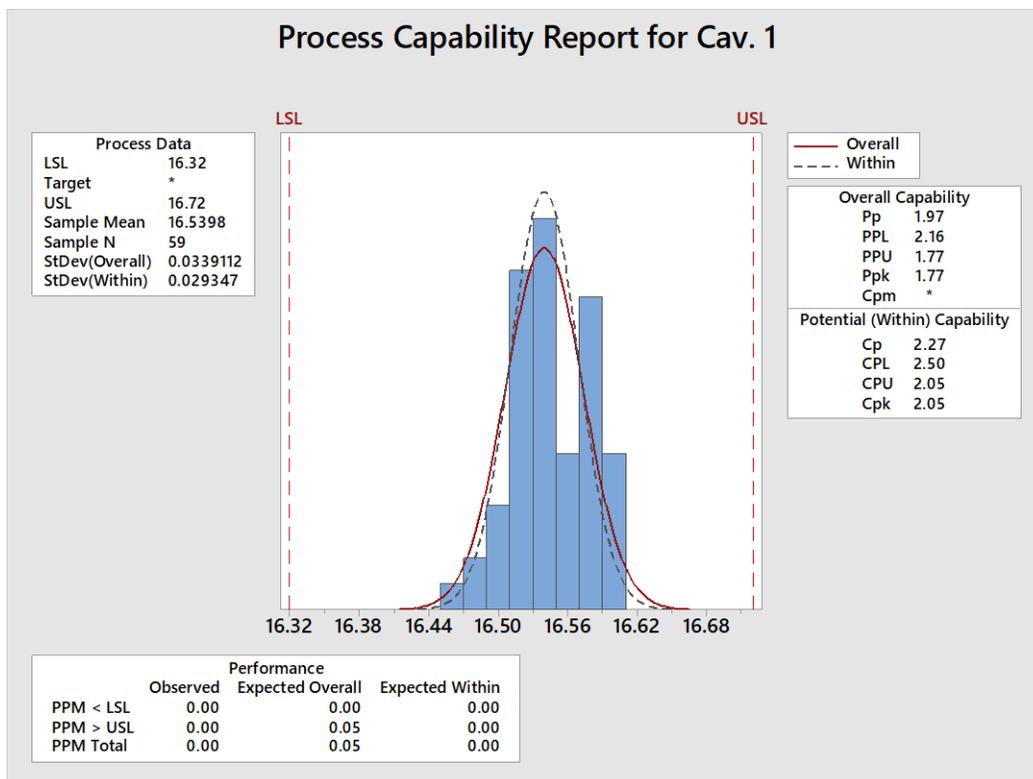


Fig. 31. Estudio de capacidad de proceso cavidad 1 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

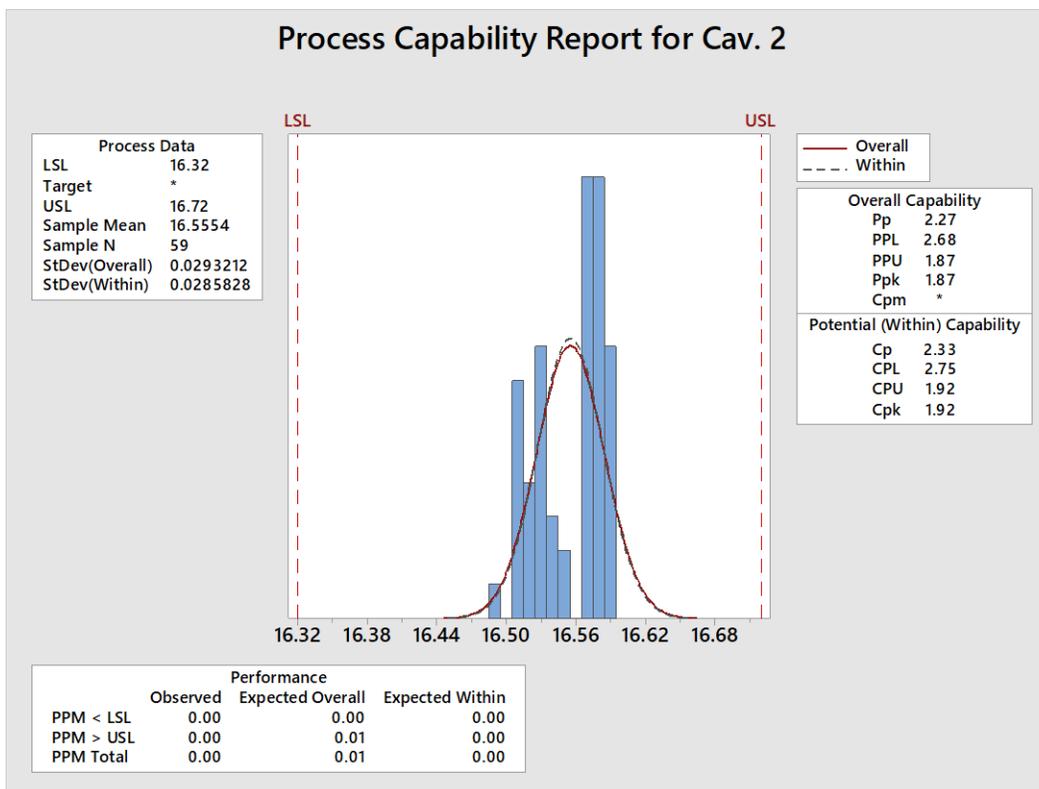


Fig. 32. Estudio de capacidad de proceso cavidad 2 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

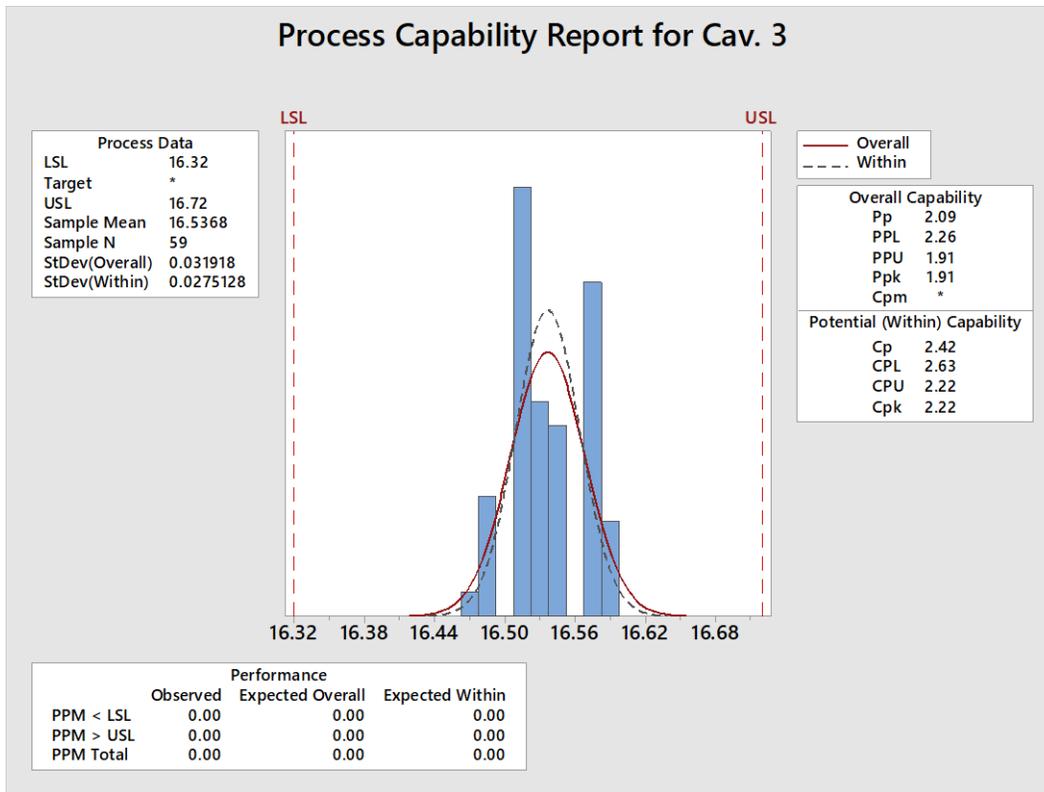


Fig. 33. Estudio de capacidad de proceso cavidad 3 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

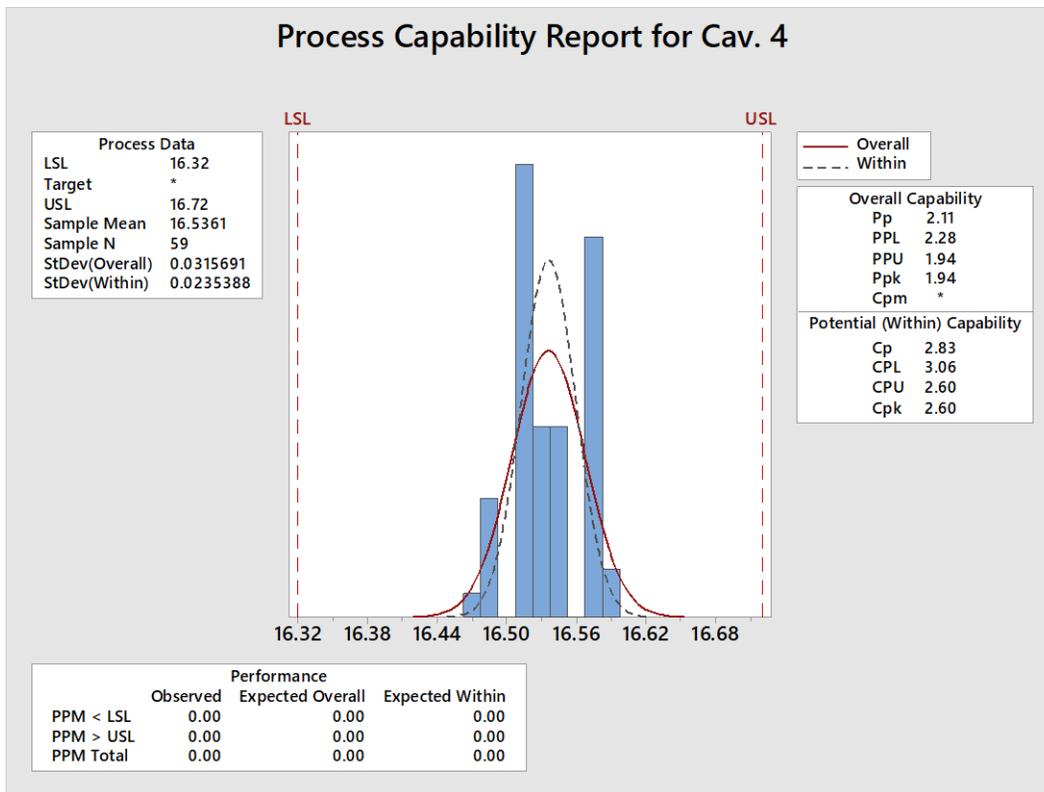


Fig. 34. Estudio de capacidad de proceso cavidad 4 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

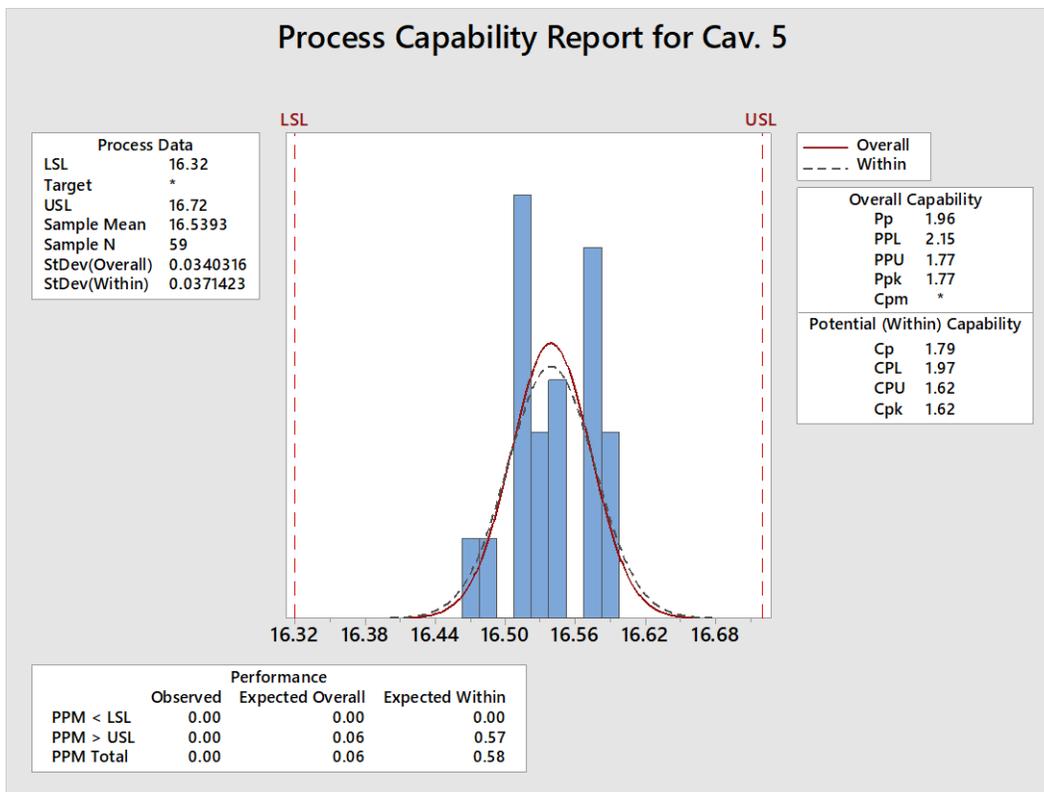


Fig. 35. Estudio de capacidad de proceso cavidad 5 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

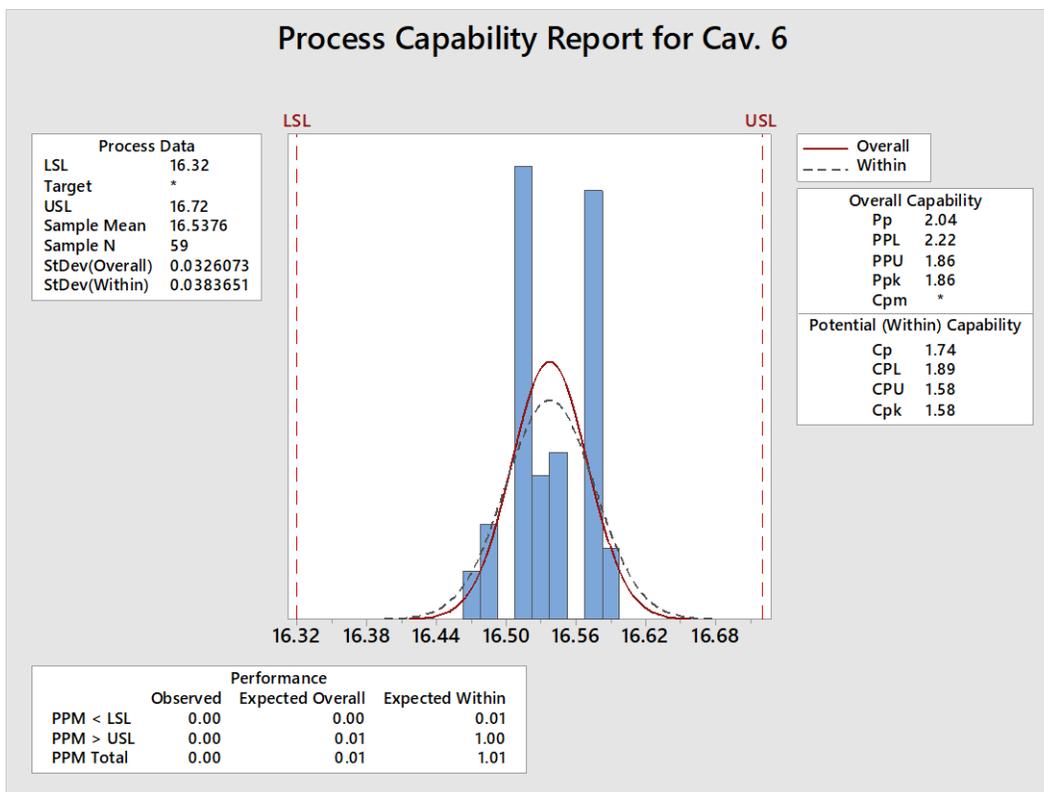


Fig. 36. Estudio de capacidad de proceso cavidad 6 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

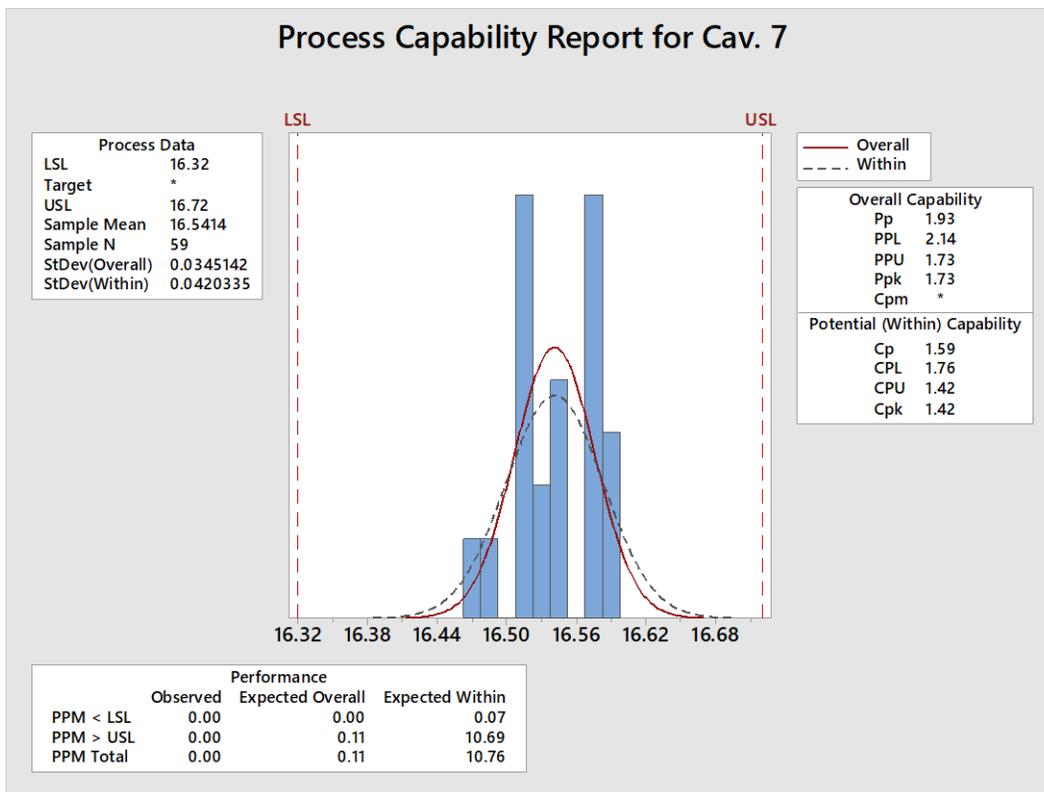


Fig. 37. Estudio de capacidad de proceso cavidad 7 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

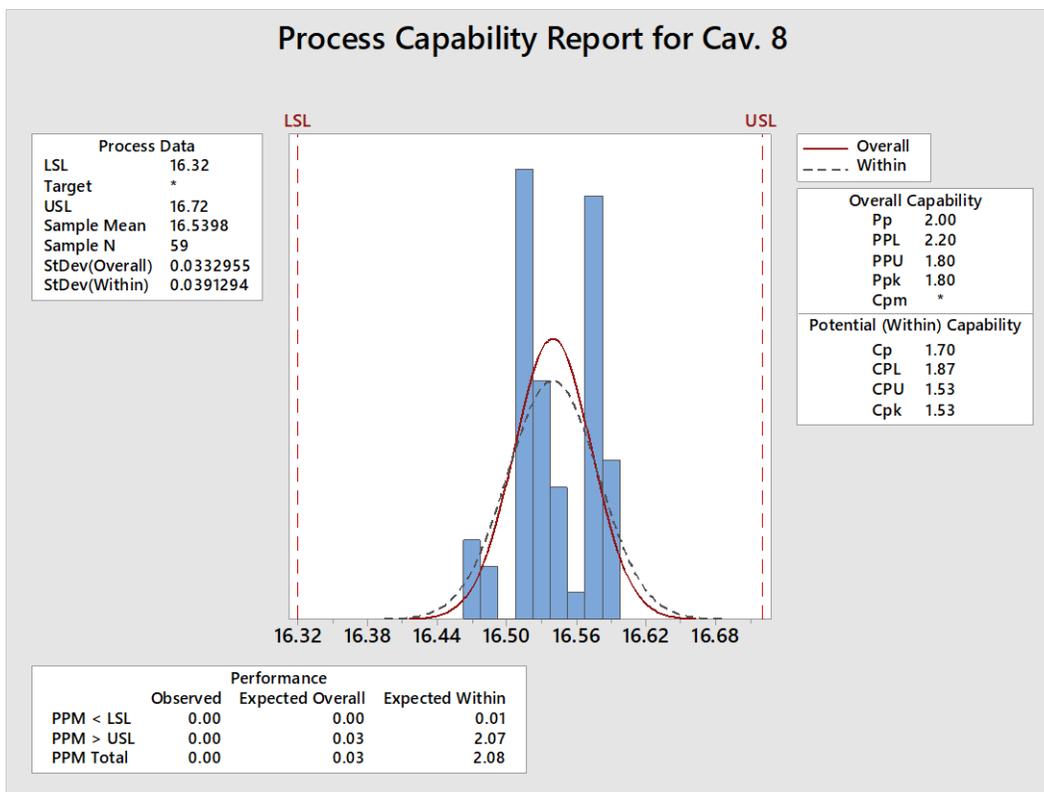


Fig. 38. Estudio de capacidad de proceso cavidad 8 de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6. Discusión de resultados

El molde nuevo de colada caliente, de ocho cavidades, de inserción y doble tiro con motor de desenroscado activado por motor hidráulico, redujo las fallas de calidad un 97.93%, presentando una disminución de 5.32% (dato obtenido de una población de 1,800,000 piezas) a 0.11% (dato obtenido de una población de 9,216 piezas), y liberó la capacidad instalada de las máquinas de moldeo 301, 302, 303, 304, 305 y 306 un 83.33%, representándose como un ahorro anual de \$220,000 dólares.

El desempeño del proceso fue validado mediante los resultados del capítulo cinco, sin embargo, lo ideal sería evaluar también el desempeño del molde previo a la liberación de este a producción en masa mediante algún proceso de validación de la herramienta, en este caso no fue parte del alcance del proyecto por cuestiones de limitación de tiempo, la corrida de validación del molde fue efectuada en la semana 19 del año 2020, y dado que el presente documento debía concluirse en la semana 23, no fue posible realizar tal validación. Para una investigación futura, el molde puede ser evaluado mediante la corrida de mínimo 3 lotes de producción (equivalente aproximadamente a 12 semanas).

Las tablas 8 a la 15, muestran las variables obtenidas en los diseños de experimentos de cada cavidad para validar la dimensión crítica en cuestión, dichos datos fueron base para desarrollar los resultados de las figuras 23 a 30, mostrando principalmente datos normales en todas las cavidades, las gráficas de interacción de la variable de salida muestran los parámetros de proceso recomendados para controlar el diámetro 16.52 +/- 0.20 mm crítico del producto:

- Temperatura de molde: 95°C
- Temperatura de la masa: 295°C
- Presión de empaque y sostenimiento: 35 Bar

Las figuras 31 a 38 muestran el estudio de capacidad de proceso efectuado en cada cavidad del molde, presentan un índice de capacidad de proceso mayor a 1.33 en todas ellas tal como fue especificado en los objetivos generales de este documento.

Tabla 16. Sumario de índices de capacidad de proceso por cavidad del molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

Cavidad	1	2	3	4	5	6	7	8
Valor C_{PK}	2.05	1.92	2.22	2.60	1.62	1.58	1.42	1.53

6.1 Comparativo de antes y después de implementación de molde nuevo

El desarrollo de este proyecto permitió hacer una evaluación comparativa de algunas características previo y posterior a la implementación del molde nuevo. La tabla 17 muestra una evaluación de la reducción en tiempo de ciclo, incremento de porcentaje de eficiencia del centro de trabajo, porcentaje de "First Past Yield" obtenido en las corridas de validación, porcentaje de piezas rechazadas y porcentaje de capacidad instalada liberada.

Tabla 17. Comparativo antes y después de implementación de molde nuevo. Fuente: Elaboración propia.

Características	Antes de Implementación	Después de Implementación
Tiempo de ciclo	55 segundos para producir una pieza	25 segundos para producir una pieza
Porcentaje de eficiencia DEL WC	83%	99.89%
Porcentaje de "First Past Yield"	81%	100%
Porcentaje de piezas rechazadas	5.32%	0.11%
Porcentaje de capacidad instalada disponible	40.67%	76.21%

Los objetivos y la comprobación de la prueba de hipótesis de este proyecto fueron logrados mediante el uso e interpretación de diferentes herramientas, métodos estadísticos y análisis de datos como pruebas de normalidad, análisis de capacidad de proceso, ANOVA, diseño de experimentos factorial, análisis de simulación de flujo, diseño para manufactura y ensamble y carga de máquinas mostrados en las tablas 8 a 15 y figuras 23 a 38.), considerando un mínimo tamaño de muestra de 59 unidades por cavidad del molde nuevo.

Capítulo 7. Conclusiones

El molde nuevo de colada caliente, de ocho cavidades, de inserción y doble tiro con motor de desenroscado activado por motor hidráulico, redujo las fallas de calidad de 5.32% a 0.11%, y liberó la capacidad instalada de máquinas de moldeo de 40.67% a 76.21% en el producto 2610013854, con un nivel de confianza y confiabilidad de 95%, mostrados en la tabla 17.

La investigación futura recomendada es evaluar el molde mediante una corrida de mínimo tres lotes de producción (equivalente aproximadamente a 12 semanas con un número de horas más significativo) para construir intervalos de confianza para la estimación de resultados completos.

Capítulo 8. Referencias

- Ahmad, I., & Al-aney, K. (2009). Loading and sequencing jobs with a fastest machine among others. *Advances in Production Engineering & Management*, 127-139.
- Alex, F. M. (2015). *Design and implementation on an automated pick and place system for Johanson Technology, Inc.* San Luis Obispo: California Polytechnic State University.
- Arriola, J. (2015). *Capacidad instalada y producción potencial en la industria vasca.* Bilbao: Universidad del País Vasco.
- Becker, K., & Licht, F. (1998). *Standards & Practices of Plastics Molders.* Washington: The Society of Plastics Industry, Inc.
- Branson, R. (2008). Investigación de operaciones. En R. Branson, *Investigación de operaciones* (págs. 309-340). Michigan: A. Works.
- Bryce, D. M. (1996). *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals.* Paisley: Society of Manufacturing Engineers.
- Candal, M. V., & Diaz, A. E. (2009). Comparación entre moldes de canales calientes, semicalientes y fríos en el proceso de inyección de piezas plásticas. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 59-60.
- de Miranda, D. A., & Nogueira, A. L. (2018). Simulation of an Injection Process Using a CAE Tool: Assessment of Operational Conditions and Mold Design on the Process Efficiency. *Materials Research*, 1-14.
- Dovich, R. A. (1990). *Reliability Statistics.* Chicago: Amer Society for Quality.
- G., P. (25 de Julio de 2017). *Creative Mechanism Blog.* Obtenido de Mold Flow Analysis is Critical to the Consumer Product Development Process: <https://www.creativemechanisms.com/blog/mold-flow-analysis-is-critical-to-consumer-product-development-process>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos.* México: McGraw-Hill Interamericana.
- Hernández, C. (2015). *Relays.* Madrid: McGraw-Hill.
- Inc., R. A. (2012). *Scientific Molding Pocket Guide.* Dracut: Routsis Training.
- Jimenez, M. (2019). Carga de máquinas. *Control de Piso*, (págs. 1-6). Tijuana.
- Juan Sierra, C. V., & Juan F. Botero-Cadavid, J. P. (2017). Análisis y modelamiento de simulaciones de esfuerzos residuales en piezas plásticas inyectadas empleando correlaciones robustas. *Revista Materia*, 2-11.
- Kumar, Shashi. (2 de December de 2019). Obtenido de Grand View Research: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-plastics-market>
- López Reyes, D. (2012). *El método Húngaro de Asignación: Aplicaciones.* Sevilla: Unviersidad de Sevilla.
- Prada Ospina, R., & Acosta-Prado, J. C. (2017). El moldeo en proceso de inyección de plásticos para el logro de objetivos empresariales. *Dimensión Empresarial*, 157-158.
- Report, O. J. (13 de Marzo de 2012). Tecnología de Produccion. *Tecnología de Producción*, págs. 30-35.
- Romo De Vivar Reta, A. (2015). *Modelado y resolución de problemas de carga de máquinas en talleres con rutas alternativas. Aplicación a una empresa de fabricación de electrodos.* Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Schmidt, P. A. (2007). *Planificación y Control de la Producción.* Madrid: Universidad Nacional de Misiones.

- Suárez Castrillón, A. M., Preciado, W. T., & Calderón Nieves, P. R. (2015). Aplicación de herramientas CAD/CAM para el diseño y fabricación de prototipos de moldes de inyección de plásticos. *SciELO*, 1-8.
- V., E. (Marzo de 2017). Colada Fría - Colada Caliente. México, Baja California.
- Villar, J. (12 de Agosto de 2008). *QuimiNet.com*. Obtenido de QuimiNet: <https://www.quiminet.com/articulos/los-moldes-de-inyeccion-de-plastico-de-colada-y-canal-frios-31615.htm>