

# UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



## POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

ANÁLISIS DE UN PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN  
EN LA MÁQUINA BOY EN UNA EMPRESA MAQUILADORA  
DE ARNESES DE HERMOSILLO, SONORA

# T E S I S

PRESENTADA POR

**GLORIA PAOLA ORTIZ ESPINOZA**

Desarrollada para cumplir con uno de los  
requerimientos parciales para obtener  
el grado de Maestra en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS  
M.C. CARLOS ANAYA EREDIAS

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

Noviembre 2014

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

## RESUMEN

La industria del plástico es una de las principales industrias de más rápido crecimiento en el mundo de hoy, debido a que cada año las cantidades de los productos plásticos utilizados es cada vez mayor. Actualmente, el moldeo por inyección representa el proceso más importante para manufacturar partes plásticas debido a la facilidad de fabricación de artículos de alta calidad, además, tiene algunas ventajas como una alta estabilidad dimensional, ciclos cortos de producción, superficies finas y limpias en los productos, moldeo fácil de formas complicadas y bajos costos en la producción, por lo tanto, es un proceso ampliamente utilizado en las organizaciones industriales. Resolver problemas relacionados con la calidad durante el proceso tiene un efecto directo en el beneficio esperado para las empresas ya que al igual que en muchos procesos de fabricación, cumplir las especificaciones requeridas significa mantener las características de calidad bajo control.

En el proceso de moldeo por inyección la calidad de las piezas moldeadas se encuentra fuertemente influenciada por los parámetros y condiciones de procesamiento, por lo que en el siguiente trabajo de investigación se analizan los factores críticos que influyen en la calidad de la pieza moldeada 1-1532082-9 a nivel experimental.

Para conseguir el objetivo propuesto se utiliza la técnica de diseño de experimentos en base a la metodología de superficie de respuesta en forma conjunta con algunas herramientas de calidad como histogramas, estudios de capacidad, gráficas de control, entre otras, además del empleo de técnicas de análisis estadísticos. La combinación de estas técnicas se realizó en forma estructurada y metódica, siguiendo un plan conjugado de etapas, que comprenden desde la planeación previa al experimento hasta el análisis de los resultados obtenidos y la definición de valores óptimos de cada parámetro para el proceso de moldeo por inyección.

## **ABSTRACT**

Plastics industry is one of the fastest growing major industries in the world today. Every year, the amount of plastic products used is increasing by changing from another material to plastics products. Ease of manufacture with high quality, less defect and cost-effective products makes injection molding to be one of the most accepted processes in plastic making, also it has some advantages as high dimensional stability, short production cycles, fine and clean surfaces in products, easy molding of complex shapes and low production costs, therefore, injection molding is widely used in industrial organizations. Solve problems related to quality process has a direct effect on the expected benefit for companies, because as in many manufacturing processes, meet the required specifications means keeping quality characteristics under control.

The quality of injection molded parts, are heavily influenced by processing parameters and conditions, in this study the critical factors that influence the quality of the molded part 1-1532082-9 are analyzed.

To achieve the aim the design of experiments technique is used based on the response surface methodology together with some quality tools such as histograms, capability studies, control charts, among others, and the use of techniques statistical analyzes. The combination of these techniques was performed based on the methodology proposed, ranging from the pre-planning of the experiment until the analysis of the results obtained and determining the optimum values for each parameter for the molding process injection.

## **DEDICATORIAS**

A mis padres, Gilberto y Gloria, quienes me han brindado su apoyo incondicional durante estos 25 años. Gracias por todos los sacrificios que han hecho por mí, por la educación que me ofrecieron y por haber hecho de mí una persona honesta y responsable. A ustedes que me ayudaron a comprender que hay tiempo para realizar cualquier actividad y que los objetivos se pueden lograr si se hacen con dedicación. Son mis grandes ejemplos de vida y a quienes admiraré por siempre.

A mi hermanos Gilberto y Alejandra, a mis queridos abuelos Eva Hermila y Gilberto, Beatriz y Alfonso, y a mi familia completa tíos y primos por los agradables momentos que hemos pasado, por su amor y comprensión. Por sus buenos ejemplos y por sus consejos que me han ayudado a salir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutor, Carlos Anaya, quien me recibió con las puertas abiertas y me apoyó desde el primer momento que me aceptó como tesista. Gracias por siempre haber estado disponible para ayudarme y guiarme en mi proyecto, por la paciencia que tuvo conmigo y por todo ese tiempo que me dedicó incluso estando fuera de su horario de trabajo.

A mis maestros, quienes me guiaron y apoyaron durante el desarrollo de mi maestría, gracias por brindarme su conocimiento y por haberme comprendido y entendido aquellas veces en las que, por cuestiones de trabajo, fallé en algunas ocasiones.

A mis compañeros de maestría, a todos y cada uno de ustedes que me ayudaron en algún momento, siempre amables y con la mejor disposición. En especial le quiero agradecer a mi gran amigo Pedro Sánchez, quien me apoyó desde el primer día de maestría estando siempre conmigo, y a mi amiga y maestra Mirna Aguayo que siempre estuvo en la disposición de ayudar en cualquier momento, gracias por todo el tiempo que me dedicaron y por su paciencia.

Al ingeniero de moldeo Andrés Valenzuela quien me dio la oportunidad de desarrollar el proyecto en la empresa y me proporcionó los recursos necesarios para realizar la investigación, y al equipo de moldeo por su tiempo invertido en el proyecto y por atendernos siempre con la mejor disposición.

A mi novio, Octaviano Rodríguez, por todo su apoyo durante este tiempo, por haberme ayudado cuando lo necesitaba y por haberme brindado sus conocimientos como ingeniero de moldeo al estar siempre presente en la realización del proyecto.

Al Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, por haberme recibido para realizar un intercambio de investigación, especialmente gracias a Daniele Fournier, quien me apoyó durante el proceso de aceptación y a mi tutora extranjera Claude Baron, quien me dirigió durante mi estancia en la universidad. Gracias por el tiempo que me dedicaron, por sus comentarios y consejos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa Integral de Fortalecimiento Institucional (PIFI) por su apoyo económico.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT .....	ii
DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Presentación.....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	3
1.3. Objetivo General.....	3
1.4. Objetivos específicos .....	3
1.5. Hipótesis.....	4
1.6. Alcances y delimitaciones .....	4
1.7. Justificación .....	5
2. MARCO DE REFERENCIA .....	6
2.1. Moldeo por inyección .....	6
2.1.1. Ciclo de inyección .....	7
2.2. Máquinas de inyección .....	9
2.2.1. Elementos esenciales de una unidad de inyección .....	10
2.2.2. Tipo de máquinas de inyección .....	11
2.2.3. Mantenimiento / Calibración .....	13
2.3. Calidad en los productos .....	15
2.4. Parámetros que influyen en el proceso de moldeo por inyección .....	16
2.5. Comportamiento del material dentro del molde .....	18
2.6. Problemas en el moldeo por inyección .....	20
2.7. Herramientas de la calidad.....	21
2.8. Capacidad de proceso .....	22
2.8.1. Índices de capacidad de proceso .....	23



2.9. Diseño de experimentos .....	24
2.9.1. Diseño factorial $2^k$ .....	25
2.9.2. Comparación de medias .....	27
2.9.3. Bloques aleatorizados .....	28
2.9.4. Superficie de respuesta.....	29
2.10. Software .....	31
2.11. Análisis de estudios previos.....	31
3. METODOLOGÍA.....	34
3.1. Planeación previa al experimento .....	36
3.2. Elección del diseño de experimento .....	37
3.3. Realización del experimento .....	39
3.4. Análisis estadístico de los datos .....	39
3.5. Implementación de resultados.....	40
4. IMPLEMENTACIÓN.....	41
4.1. Planeación previa al experimento .....	41
4.2. Elección del diseño de experimento .....	52
4.3. Realización del experimento .....	52
4.4. Análisis estadístico de los datos .....	53
4.5. Implementación de resultados.....	60
5. Conclusiones y Recomendaciones .....	74
Referencias .....	78
Anexos .....	81

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2. 1.</b> Elementos esenciales de una unidad de inyección (Sánchez, 2002).....	10
<b>Figura 2. 2.</b> Máquina moldeadora BOY 15s .....	12
<b>Figura 2. 3.</b> Hoja de mantenimiento de la máquina BOY 15s .....	14
<b>Figura 2. 4.</b> Comportamiento del material dentro del molde (Sánchez, 2002). .....	19
<b>Figura 2. 5.</b> Gráfica de contorno de una superficie de respuesta .....	29
<b>Figura 2. 6.</b> Forma general del modelo de primer orden y segundo orden .....	30
<b>Figura 3. 1.</b> Metodología para realizar un diseño de experimentos (basado en Montgomery, 2005) .....	35
<b>Figura 4. 1.</b> Plano de especificación de calidad de la pieza 1-1532082-9.....	41
<b>Figura 4. 2.</b> Ayuda visual para aceptar o rechazar una pieza moldeada.....	42
<b>Figura 4. 3.</b> Imágenes de piezas no aceptables .....	42
<b>Figura 4. 4.</b> Diagrama de dispersión Orificio 1 vs Orificio 2 .....	44
<b>Figura 4. 5.</b> Histograma del Orificio 1 de 3 días de producción .....	45
<b>Figura 4. 6.</b> Gráfica de control Orificio 1 de 3 días de producción .....	46
<b>Figura 4. 7.</b> Análisis de capacidad de proceso del Orificio 1 de 3 días de producción .....	47
<b>Figura 4. 8.</b> Histograma del Orificio 2 de 3 días de producción .....	48
<b>Figura 4. 9.</b> Gráfico de control del Orificio 2 de 3 días de producción.....	49
<b>Figura 4. 10.</b> Análisis de capacidad de proceso del orificio 2 de 3 días de producción.....	50
<b>Figura 4. 11.</b> Fixture "PIN" utilizado durante el proceso de moldeo de la pieza .....	54
<b>Figura 4. 12.</b> Vernier utilizado para la medición de la altura de los orificios de la pieza .....	55
<b>Figura 4. 13.</b> Medición del grosor de los PIN en la máquina de medición OGP.....	56
<b>Figura 4. 14.</b> Medición del grosor de los PIN propuestos en la máquina de medición OGP .	56
<b>Figura 4. 15.</b> Diseño de experimentos de un solo factor.....	57
<b>Figura 4. 16.</b> Diagrama de caja Orificio 1 y 2 utilizando el Pin B .....	62
<b>Figura 4. 17.</b> Análisis de capacidad del Orificio 1 utilizando el Pin B.....	63
<b>Figura 4. 18.</b> Análisis de capacidad del Orificio 2 utilizando el Pin B .....	64
<b>Figura 4. 19.</b> Gráfica de Pareto para efectos estandarizados.....	68
<b>Figura 4. 20.</b> Prueba de normalidad para los residuales .....	69
<b>Figura 4. 21.</b> Diagrama de caja de puntos centrales .....	71

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2. 1.</b> Tiempos y movimientos del ciclo de inyección (Sánchez, 2002). .....	8
<b>Tabla 2. 2.</b> Tipos de máquinas para el moldeo por inyección de plásticos (Sánchez, 2002). 12	12
<b>Tabla 2. 3.</b> Herramientas básicas de la calidad (Kairong, 2010) .....	22
<b>Tabla 2. 4.</b> Descripción de los índices de capacidad de procesos (Montgomery, 2004) .....	23
<b>Tabla 4. 1.</b> Datos obtenidos en 3 días de producción .....	43
<b>Tabla 4. 2.</b> Resultados gráfico de control del Orificio 2 .....	49
<b>Tabla 4. 3.</b> Factores constantes que intervienen en el proceso de moldeo.....	51
<b>Tabla 4. 4.</b> Factores variables que intervienen en el proceso de moldeo.....	51
<b>Tabla 4. 5.</b> Corrida de exploración.....	52
<b>Tabla 4. 6.</b> Resultados de la primer corrida de exploración .....	53
<b>Tabla 4. 7.</b> Análisis de varianza para el Orificio 1 .....	53
<b>Tabla 4. 8.</b> Análisis de varianza para el Orificio 2 .....	54
<b>Tabla 4. 9.</b> Diseño de experimentos con un solo factor (PIN) .....	58
<b>Tabla 4. 10.</b> Resultados del diseño de experimentos con un solo factor para el Orificio 1 y Orificio 2 .....	58
<b>Tabla 4. 11.</b> Prueba de diferencia de media para Orificio 1 .....	59
<b>Tabla 4. 12.</b> Prueba de diferencia de medias para Orificio 2.....	59
<b>Tabla 4. 13.</b> Datos obtenidos en 1 día de producción con el Pin B .....	60
<b>Tabla 4. 14.</b> Análisis estadístico de los datos obtenidos para Orificio 1 y Orificio 2 con Pin B .....	61
<b>Tabla 4. 15.</b> Prueba de diferencia de medias con Pin B para Orificio 1 .....	61
<b>Tabla 4. 16.</b> Prueba de diferencia de medias con Pin B para Orificio 2 .....	61
<b>Tabla 4. 17.</b> Diseño experimental para Bloque 1 .....	65
<b>Tabla 4. 18.</b> Diseño experimental para Bloque 2 .....	66
<b>Tabla 4. 19.</b> Resultados diseño experimental bloque 1.....	67
<b>Tabla 4. 20.</b> Resultados diseño experimental bloque 2.....	67
<b>Tabla 4. 21.</b> Análisis de varianza de diseño de bloques .....	67
<b>Tabla 4. 22.</b> Efectos estimados y coeficientes de respuesta.....	68
<b>Tabla 4. 23.</b> Diseño experimental basado en puntos centrales.....	70
<b>Tabla 4. 24.</b> Experimento de confirmación.....	72
<b>Tabla 4. 25.</b> Resultados experimento de confirmación .....	72

<b>Tabla 4. 26.</b> Análisis de varianza para los distintos valores de presión.....	73
<b>Tabla 4. 27.</b> Prueba Turkey para comparaciones de medias .....	73
<b>Tabla 5. 1.</b> Valores óptimos de los parámetros variables de la máquina BOY .....	75

# 1. INTRODUCCIÓN

Toda organización transformadora se encuentra en una constante búsqueda en la reducción de los tiempos de producción y en la mejora continua de los aspectos de calidad de sus productos. Los fabricantes tienen tres objetivos principales: 1) la producción de bienes que cumplan con las especificaciones de los clientes; 2) mejorar la eficiencia del proceso en los tiempos de ciclo, reducir los costos de mano de obra y el consumo de energía; 3) aumentar la robustez del proceso mediante la reducción de sensibilidad a pequeños cambios en el proceso o los parámetros del material (mks, 2012). Algunas de las acciones que las empresas desarrollan para el logro de sus objetivos, implica la adaptación de sus métodos productivos, además de procurar aprovechar al máximo los elementos de los mismos, así como optimizar los tiempos de ciclo, entre otras cosas (Camisión y Pérez, 2010).

En el entorno del mercado mundial, es esencial para las empresas industriales mantener o mejorar su competitividad, lo que requiere transición secuencial para el desarrollo de productos concurrente (Zargi et al., 2009). Debido al constante cambio en los productos, en el desarrollo de sus procesos y ajustes en los sistemas de producción existentes, es esencial elegir métodos adecuados que se utilizarán para el desarrollo óptimo del producto de principio (Curic et al., 2012).

En el presente capítulo se abordarán los puntos referentes al planteamiento de la problemática junto con los objetivos de la investigación, hipótesis, alcances y delimitaciones y justificación de por qué es necesario realizar el estudio.

## 1.1. Presentación

El proyecto se desarrollará en TE Connectivity, empresa líder global de componentes electrónicos de ingeniería, soluciones de redes, sistemas de telecomunicación marinos y bienes de consumo en más de 150 países. La compañía diseña, fabrica y comercializa productos para varias industrias incluyendo la industria automovilística,

sistemas de comunicación de datos y electrónica de consumo, telecomunicaciones, industria aeroespacial, defensa y marina, medicina, energía e iluminación.

TE Connectivity cuenta con varias líneas productivas las cuales son divididas en dos áreas: AD&M e Industrial. Dentro del área de AD&M (Aerospace, Defense and Marine), se encuentra el departamento de moldeo, el cual es encargado de surtir material a líneas como "Amplimate", "Microdot" y "MTC". El departamento de moldeo es conformado a su vez por el área Termoplásticos, Machine Shop, Silicón y Desflashado. Dentro del área de Silicón se encuentra la máquina de inyección "Boy" donde se manufactura el componente 1-1532082-9 también llamado "Submarino", por medio del proceso de moldeo por inyección, en el cual se tiene un porcentaje de piezas aceptables de alrededor 30%.

Durante el proceso de moldeo por inyección de la pieza se presentan dos graves problemas, los cuales hacen que el producto no cumpla con los requerimientos de calidad exigidos por la empresa. El primer problema consiste en que el diámetro superior del moldeo no está dentro especificación, es decir, dentro del rango de medida de 0.118 a 0.122 mm. El segundo problema se centra en la calidad del moldeo del silicón ya que en ocasiones sale material incompleto, mientras que en otras se derrama por la pieza, además cuando el Shell o Housing sale de la máquina inyectora, en algunas situaciones presenta marcas o golpes.

Cuando alguno de estos defectos se presenta en el componente, éste tiene que ser retrabajado, pero en algunas ocasiones resulta imposible y el material pasa a formar parte del desperdicio. En el departamento de moldeo los índices de desperdicio varían entre el 40% y 50% del material productivo, es decir la mitad del material usado en la máquina inyectora es desperdiciado, esto sin contar el material que tiene que ser re trabajado. Además, se utiliza en promedio 20 horas a la semana en re trabajar el material dañado.

Estos problemas traen como consecuencia que el componente no se entregue a tiempo para el ensamble final de la línea Microdot, ocasionando que la orden se deje

en “estado de espera” y se detengan 7,214 dólares americanos por cada orden, teniendo en total 122,638 dólares americanos sin poder embarcar. Además, los métricos de la empresa como Past Due, es decir, las órdenes atrasadas y vencidas de acuerdo a la fecha de entrega prometida al cliente, y Delivery Goal donde se monitorea la cantidad de órdenes entregadas a tiempo en el mes, son afectados por la presencia del problema en el componente, ya que la orden no se está embarcando en la fecha establecida.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Al no poder tener el material a tiempo, los métricos de la empresa aumentan de manera negativa, además de considerar que alrededor del 50% de los componentes tienen que ser retrabajados, lo cual reduce el tiempo efectivo tanto de la máquina como de las operadoras y aumentan los costos de producción.

No se cuentan con los valores óptimos de los parámetros que afectan directamente a la producción del componente 1-1532082-9 en el área del silicón, los cuales originan que el material presente problemas de calidad y no pueden ser utilizados en las órdenes finales de Microdot.

## **1.3. Objetivo General**

Determinar los valores óptimos de los parámetros de la máquina Boy, para reducir el número de defectos en piezas moldeadas a través de un diseño de experimentos utilizando la metodología de superficies de respuesta.

## **1.4. Objetivos específicos**

1. Determinar el estado de proceso productivo actual
2. Identificar, definir y medir los parámetros que afectan al proceso productivo.
3. Determinar y analizar los valores estándar óptimas para el proceso

## **1.5. Hipótesis**

Por medio de la identificación y control de los factores que influyen en el proceso productivo, se reducirán los defectos en piezas moldeadas con base en la utilización de la metodología superficies de respuesta.

## **1.6. Alcances y delimitaciones**

El proyecto será desarrollado dentro de la empresa TE Connectivity, en el área de silicón. Específicamente se busca mejorar el proceso de moldeo por inyección de silicón del componente 1-1532082-9 que se lleva a cabo en la máquina Boy.

Se enfocará en determinar los valores óptimos de aquellos parámetros de la máquina que inciden de manera significativa durante el proceso de moldeo por inyección para disminuir los defectos en piezas moldeadas. Con esta información se podrá mejorar el producto y la eficiencia su proceso productivo. Para ello se utilizarán diversas herramientas estadísticas como el diseño de experimentos para lograr entender sus características e investigar cómo las entradas afectan las respuestas. La utilización de un software estadístico es necesaria para analizar los datos obtenidos.

Algunas limitaciones del proyecto son:

- Los valores óptimos determinados serán exclusivamente para el proceso anteriormente explicado, no serán válidos para cualquier otro proceso que no cumpla con las especificaciones señaladas durante el proyecto.
- El tiempo para desarrollarlo debe estar apegado a la duración de la Maestría, por lo que no es parte del proyecto validar el control del proceso.
- Acceso a información disponible en las bases de datos que tiene acceso la Universidad de Sonora y aquellas libres.



## **1.7. Justificación**

La importancia de realizar el presente proyecto consiste en la identificación de las causas que ocasionan defectos en el componente 1-1532082-9, lo que trae como consecuencia aspectos como la insatisfacción por parte del cliente al no poder embarcar la orden final en el tiempo establecido y presión laboral del personal productivo, entre otros. Se pretende reducir el porcentaje de re trabajos, así como también minimizar costos por factor de desperdicio, lo anterior por medio del control de la variabilidad del proceso productivo en el área de Silicón, para incrementar la satisfacción del cliente al recibir sus órdenes en el tiempo definido. Internamente se trata de eliminar y/o reducir la cantidad de órdenes contenidas en producción, lo cual disminuye las órdenes en Past Due y aumenta el dinero facturado para la organización.

Así también, el proceso de trabajar de forma más eficiente hará que los operadores se sientan satisfechos con su trabajo, logrando así un mejor ambiente laboral en la organización. Lo anterior, basado en la utilización de procesos productivos estandarizados que generen un ambiente productivo ordenado, controlado y eficaz, lo cual beneficiará a mediano plazo, tanto a la organización como a su recurso humano.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

En la actualidad, los circuitos electrónicos han tomado gran importancia en la industria, por lo que su comportamiento debe ser tan eficaz y eficiente como sea posible. Por lo tanto, la transferencia de calor entre componentes se ha considerado relevante, ya que este fenómeno puede acarrear graves problemas de funcionamiento para cada uno de ellos y para el proceso como un todo (Amaya et al., 2011).

Un componente electrónico es un dispositivo que forma parte de un circuito eléctrico y son destinados a una amplia gama de industrias que van desde el sector automotriz, aparatos electrodomésticos, aeroespacial e industria militar, hasta el sector de telecomunicaciones, computadoras y artículos electrónicos.

Debido a la creciente demanda de piezas electrónicas hoy en día, los componentes de plástico son cada vez más pequeños con el fin de acomodar los sistemas portátiles y de mano (Shayfull et al., 2011). Existen diferentes procesos de conformado para plásticos tal como: moldeo por compresión, por transferencia, por inyección y por extrusión. La selección del método de moldeo depende de la forma y tamaño del producto final, el tipo de material a utilizar, la precisión y terminación de la superficie y el volumen de producción (Groover, 1997).

### **2.1. Moldeo por inyección**


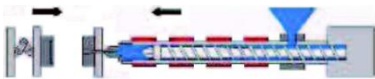

La industria del plástico es una de las principales industrias de más rápido crecimiento en el mundo de hoy. Cada año, las cantidades de los productos plásticos utilizados es cada vez mayor (Hussin et al., 2013). Es por eso que el moldeo por inyección representa el proceso más importante para manufacturar partes plásticas debido a la facilidad de fabricación de artículos de alta calidad (Shuaib et al., 2012), además tiene algunas ventajas como una alta estabilidad dimensional, ciclos cortos de producción, superficies finas y limpias en los productos, moldeo fácil de formas complicadas y bajos costos en la producción (Kurt et al., 2009), por lo tanto, el moldeo por inyección es un




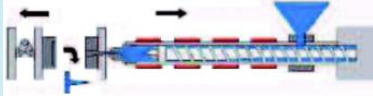
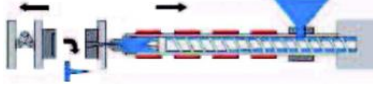
proceso ampliamente utilizado en las organizaciones industriales (Ming-Tsan et al., 2009).

Además permite la fabricación de una gran variedad de formas, desde las más sencillas hasta tridimensionales (3-D), y piezas extremadamente pequeñas hasta muy grandes. Cuando es necesario, estos productos pueden ser moldeados a tolerancias muy pequeñas y precisas, y con peso físico de fracciones de un gramo (Rosato et al., 2000). Ejemplo de piezas moldeadas por inyección se pueden encontrar en cualquier parte de la vida cotidiana, e incluye juguetes, piezas de automóviles, artículos del hogar, aparatos electrónicos, entre otros (Stanek et al., 2011).

### 2.1.1. Ciclo de inyección

El proceso de moldeo por inyección de plástico es un proceso cíclico y en una máquina convencional puede considerarse constituido por los siguientes tiempos y movimientos descritos en la tabla 2.1.

Movimiento	Descripción	Descripción gráfica
<b>Tiempo de cierre del molde</b>	Durante el cual actúa el sistema de cierre, la máquina ejecuta el movimiento necesario y cierra el molde	
<b>Tiempo de avance de la unidad de inyección</b>	La unidad de inyección, que hasta ese momento se encuentra separada del molde, avanza hasta que la boquilla se posa sobre el punto de entrada del molde.	
<b>Tiempo de llenado de inyección</b>	El pistón o el husillo avanzan realizando la inyección del material. En este tiempo el molde se llena con el polímero inyectado.	

<p><b>Tiempo de compactación</b></p>	<p>El molde permanece cerrado y el polímero comienza a enfriarse dentro de él. Cuando el material comienza a enfriarse se contrae, por lo que para mantener la presión en el molde durante este período se suele introducir lentamente algo más de material dentro de la cavidad de moldeo, lo que compensa la contracción</p>	
<p><b>Tiempo de retroceso de la unidad de inyección</b></p>	<p>Cuando la entrada a la cavidad solidifica la unidad de inyección retrocede, y comienza el movimiento rotatorio del husillo para plastificar el material para la siguiente etapa</p>	
<p><b>Tiempo de enfriamiento</b></p>	<p>Necesario para enfriar el polímero que ocupa las cavidades del molde. El enfriamiento del material comienza tan pronto como el polímero toca las paredes frías del molde, y finaliza cuando se extrae la pieza.</p>	
<p><b>Tiempo de apertura del molde</b></p>	<p>Durante el cual se abre el molde</p>	
<p><b>Tiempo de extracción</b></p>	<p>Durante el cual se sacan las piezas moldeadas de las cavidades de moldeo.</p>	

*Tabla 2. 1. Tiempos y movimientos del ciclo de inyección (Sánchez, 2002).*

## 2.2. Máquinas de inyección

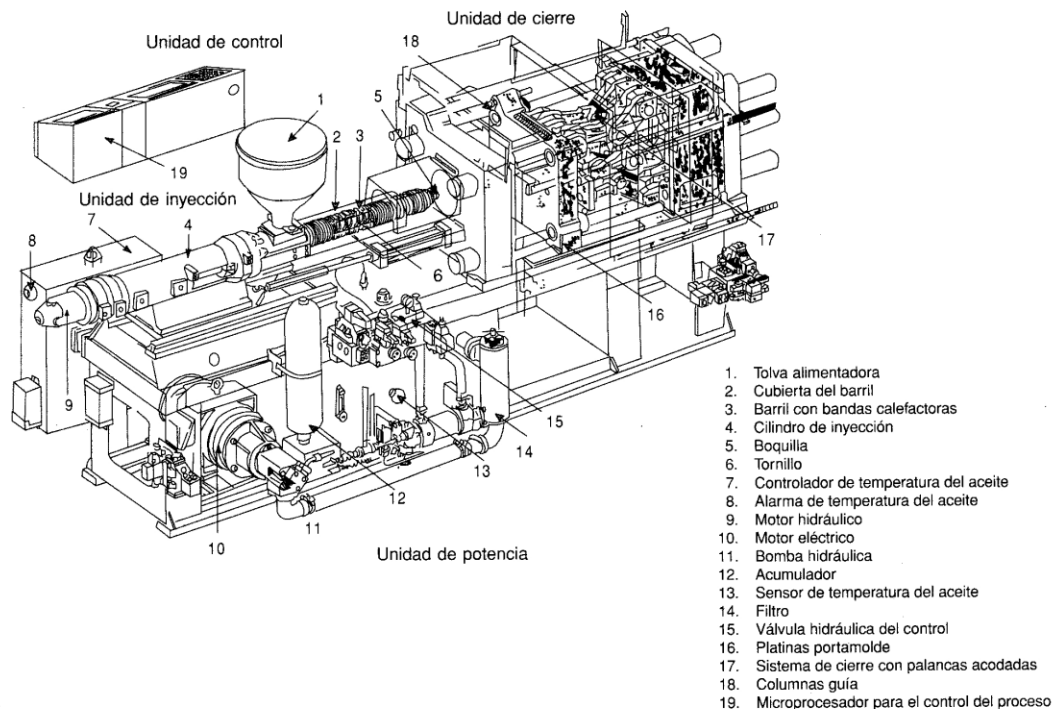
Una máquina de inyección es un equipo capaz de plastificar material polimérico en forma de resina y bombearlo hacia un molde en donde llena una cavidad y adquiere la forma del producto deseado. Una inyectora se compone de cuatro unidades principales:

- a) **Unidad de cierre:** Consta de los dispositivos necesarios para la colocación, accionamiento y funcionamiento de las dos mitades del molde. Sus principales partes son las platinas porta-moldes fijas y móviles y el mecanismo de apertura y cierre del molde.
- b) **Unidad de inyección:** Comprende las partes necesarias de la máquina para la carga, plastificación e inyección del plástico.
- c) **Unidad de potencia:** Comprende el conjunto de dispositivos necesarios de la máquina para transformar y suministrar la fuerza motriz a las unidades de inyección y de cierre.
- d) **Unidad de control:** es la parte necesaria de la máquina para que realice el proceso de una forma predeterminada y pueda variarse a voluntad. El sistema de control está ligado al de potencia, a través del cual las distintas señales se convierten en movimientos de las unidades de inyección y cierre. (Sánchez, 2002).

### 2.2.1. Elementos esenciales de una unidad de inyección

Los elementos esenciales de una unidad de inyección son: la tolva de alimentación, el sistema de dosificación, plastificación e inyección y la unidad de moldeo-desmoldeo. La tolva de alimentación se conecta mediante un conducto al cilindro donde tiene lugar la plastificación. El sistema de dosificación, plastificación e inyección admite la cantidad necesaria de resina, la reblandece o funde y la inyecta en el molde a través de una boquilla que, al adaptarse a presión al bebedero del molde, abre una válvula de descarga dispuesta en su extremo. Al desacoplar la boquilla, la válvula se cierra automáticamente.

Las unidades de moldeo constan de las dos partes del molde sujetas mediante piezas porta-moldes y ciertos mecanismos, generalmente hidráulicos, que tienen por misión su abertura y cierre. Estos mecanismos tienen que ser suficientemente robustos para resistir la presión del material en la etapa final de la inyección, que puede superar los 50 MPa y llegar a los 200 MPa (Sánchez, 2002). En la figura 2.1 se muestran los componentes de una máquina inyectora de plástico.



**Figura 2. 1.** Elementos esenciales de una unidad de inyección (Sánchez, 2002).

### 2.2.2. Tipo de máquinas de inyección

Existen diferentes tipos de máquinas para el moldeo por inyección de plásticos. En la tabla 2.2. se enlistan las más comunes.

Tipo de máquina	Características
<b>Máquinas de inyección con pistón</b>	Consta de un barril que se llena con material plástico, el cual es fundido mediante bandas calefactores con resistencias localizadas alrededor del barril para ser inyectado dentro del molde mediante el movimiento axial del pistón.
<b>Máquinas con sistema de preplastificación</b>	El calentamiento del material y el desarrollo de la presión necesaria para llenar el molde están aislados uno del otro. El material se calienta a la temperatura del moldeo durante la primera etapa del proceso, después pasa a un receptáculo para entrar en el molde en una segunda etapa.
<b>Máquinas de inyección con tornillo alternativo</b>	Se caracterizan por realizar la fusión e inyección del material mediante un tornillo alternativo, el cuál alterna su función de plastificar e inyectar el material fundido.
<b>Máquinas de inyección multicolor</b>	Utilizadas por la demanda de micas para luces traseras multicolores para la industria automotriz. Pueden clasificarse dentro de dos categorías: Diseño horizontal con varias unidades de inyección en paralelo una con otra y diseño vertical con unidad de empalme vertical y unidades de inyección laterales.
<b>Máquinas giratorias</b>	Se emplean varios moldes situados en una unidad giratoria ya sea horizontal o vertical. Cada moldeo se sitúa frente a la unidad de inyección para realizar el llenado del molde e inmediatamente girar la mesa para proceder al llenado siguiente.
<b>Máquinas para la inyección de espumas rígidas</b>	La técnica involucra la expansión del material fundido, ya sea de manera directa mediante el uso de un gas disuelto o de un gas producido por la descomposición de un reactivo químico a la temperatura del fundido.

<b>Máquina de coinyección</b>	Involucra el uso de dos o más unidades de inyección para inyectar cada capa con el mismo o diferente tipo de material.
<b>Máquinas de moldeo por inyección reactiva</b>	Involucra el mezclado a alta presión de dos o más líquidos, que reaccionan espontáneamente para su posterior inyección a menor presión dentro de un molde cerrado.
<b>Máquinas con diferentes arreglos en sus unidades</b>	Las posiciones relativas de las distintas unidades pueden variar de unas máquinas a otras, las 4 variaciones principales que se diferencian por la permutación de estas máquinas en su posición vertical y horizontal son: inyección y cierre horizontal, cierre horizontal con inyección vertical, cierre e inyección vertical, cierre vertical e inyección horizontal.

**Tabla 2. 2.** Tipos de máquinas para el moldeo por inyección de plásticos (Sánchez, 2002).

En el proyecto de tesis se estará trabajando con una máquina de inyección con tornillo alternativo llamada Boy 15s. Es de origen alemán y fue comprada por la empresa hace 20 años. En la figura 2.2 se muestra una imagen de la máquina inyectora utilizada por la empresa.



**Figura 2. 2.** Máquina moldeadora BOY 15s



### 2.2.3. Mantenimiento / Calibración

La gestión del mantenimiento es un factor clave en el incremento de la productividad, al reducir el número de paradas, en la disminución de costos y conseguir que las instalaciones funcionen correctamente según especificaciones. Estudios realizados indican que el efectuarse el mantenimiento técnico en el tiempo establecido y todas las operaciones previstas, el flujo de fallos de las máquinas disminuye en un 50%, en condiciones medias de explotación, lo cual posibilita la reducción de los gastos por conceptos de reparaciones y a la vez mano de obra (Miranda et al., 2003).

En cuanto a la calibración, la podemos definir como: “la comparación de un estándar de medición, o de un equipo, con un estándar o equipo de mayor exactitud, para detectar y cuantificar imprecisiones y reportarlas o eliminarlas mediante un ajuste” (EPA, 2008). En este sentido, la calibración es la actividad de control de calidad más importante dentro de la medición, ya que establece la relación del valor medido por un equipo con un valor convencionalmente real, dando validez y trazabilidad a la medición. Cada equipo debe calibrarse apegándose a las condiciones de operación, conforme a procedimientos basados tanto en las instrucciones específicas del manual de operación del equipo, como en las directrices generales provistas por los métodos normalizados (Normas Oficiales Mexicanas para la medición de contaminantes). El objetivo de la calibración es mantener y verificar el buen funcionamiento de los equipos, responder los requisitos establecidos en las normas de calidad y garantizar la fiabilidad y la trazabilidad de las medidas. Los instrumentos de medida requieren ser calibrados con más frecuencia cuanto más exactas sean sus muestras o bien más pequeñas sean sus propias tolerancias de error. En general, los intervalos de calibración dependen de factores como los requerimientos dados por un cliente o una regulación y la estabilidad con el tiempo del instrumento a calibrar.

El mantenimiento que se le efectúa a la máquina Boy 15s es aproximadamente cada 4 meses. Dicho procedimiento se detalla en la figura 2.3.

**Informe de tareas (lista completa)**

09/02/2013

Unknown Facility

Página 1

<b>Sede</b>	860		
<b>N° de tarea</b>	TA-000484		
<b>Descripción</b>	Ejecución de la Rutina de Mantenimiento Preventivo RMP-02382	<b>Prioridad</b>	3.00
<b>Asignado a</b>		<b>Multitarea</b>	No
<b>Tipo de OT</b>	MP	<b>Tarea en servicio</b>	Si
<b>Tipo de gasto</b>	MP		

Oficio	Cant. personas	Horas estimadas
--------	----------------	-----------------

<b>N° de equipo</b>	860-EQ-006760		
<b>Descripción del equipo</b>	PRENSA MOLDEADORA BOY	<b>Efectuar cada</b>	16.00 Semana(s)
<b>Localización</b>	860	<b>Tipo de programación</b>	Duplicados
<b>Sublocalización 1</b>	860-4	<b>Duración de la tarea</b>	11.00
<b>Sublocalización 2</b>	6135-6500	<b>N° de veces terminadas</b>	25.00
<b>Sublocalización 3</b>	-	<b>Tiempo de paro</b>	
<b>Última ejecución</b>	07/30/2013	<b>Debe estar parado</b>	No
<b>Próxima fecha/Ejecución</b>	11/12/2013		
<b>Arrendatario</b>			

Equipo	Nombre del medidor	Efectuado por última vez en	Aumento del medidor	Unidad de medida
--------	--------------------	-----------------------------	---------------------	------------------

**Instrucciones de la tarea**

**Código de instrucción** RMP-02382 **Última fecha de edición** 03/24/2006

Descripción del equipo: MOLDEADORA BOY

Rutina de Mantenimiento Preventivo.

**RECOMENDACIONES:**

- \* Apagar totalmente la máquina.
- \* Utilizar pulso antiestático
- \* Utilizar dielectronic PF como limpiador y desengrasante para componentes electrónicos.
- \* Utilizar papel azul y swipe.

**RUTINA DE LIMPIEZA:**

- ( ) Sopletear todos los componentes eléctricos y electrónicos.
- ( ) Limpiar cubiertas y tableros para eliminar la acumulación de polvo y suciedad.
- ( ) Limpiar con dielectronic todas las tarjetas electrónicas.
- ( ) Sopletear y limpiar todos los botones pulsadores.

**RUTINA DE INSPECCION Y ACTIVIDADES MECANICAS:**

- ( ) Revisar nivel de aceite, si esta por debajo o cercano al limite minimo, rellenar c correspondiente. Moldeadora BOY usa Aceite Hidráuluco Mobil DTE-26
- ( ) Engrasar soportes del tren vertical. Aplicar 5 tiros de grasa y limpie el exceso y vieja.
- ( ) Revisar la compuerta de seguridad, que los microswitches y los sistemas mecanicos operen adecuadamente.
- ( ) Revise las conexiones de los thermocouples y los cables de las resistencias que nc estado ni flojos o haciendo falso contacto.
- ( ) Revise el motor eléctrico por sobrecalentamiento.
- ( ) Verificar el correcto funcionamiento de botones pulsadores y de las luces indicad
- ( ) Inspeccionar que todas las tapas en los paneles y tableros electrónicos se encuent lugar.
- ( ) Verificar que las guardas de seguridad funcionen apropiadamente ( sensores conecta estado).
- ( ) Checar el correcto funcionamiento de los relevadores y/o contactores.
- ( ) Verificar que los fusibles no excedan de la capacidad requerida, y si requiere de repuestos que realmente los tengan.

**Figura 2. 3. Hoja de mantenimiento de la máquina BOY 15s**

## 2.3. Calidad en los productos

La calidad de los productos y servicios se ha convertido en uno de los factores principales del funcionamiento óptimo de una organización y debido a que en los últimos años la tendencia de los clientes se ha orientado hacia requisitos más exigentes respecto a la calidad, los fabricantes han tomado una creciente conciencia de la necesidad del mejoramiento continuo de sus procesos para obtener y mantener buenos resultados económicos en el desempeño de sus organizaciones (Camisión y Pérez, 2010).

Fabricar productos al costo más bajo y además que cumplan con los requerimientos específicos por medio del proceso de moldeo por inyección ha sido difícil para muchos fabricantes e investigadores. Su complejidad y la enorme cantidad de manipulación de parámetros durante el proceso de producción en tiempo real crean un esfuerzo muy intenso para mantener el proceso bajo control. Así mismo, la complejidad y la manipulación de los parámetros pueden causar graves problemas de calidad y altos costos de fabricación (Saurav et al. 2008). Como se ha mencionado anteriormente uno de los principales objetivos en el proceso de moldeo por inyección es mejorar la calidad de piezas moldeadas además de la reducción de tiempo de ciclo, y un menor costo de producción. Resolver problemas relacionados con la calidad durante el proceso de moldeo por inyección tiene un efecto directo en el beneficio esperado para las empresas. Al igual que en muchos procesos de fabricación, cumplir las especificaciones requeridas significa mantener las características de calidad bajo control. Las características de calidad de moldeo por inyección se clasifican como propiedades mecánicas, calidad de la superficie, dimensiones o características medibles (Bharti et al., 2012).

Es por esto que para obtener una alta calidad en piezas moldeadas por inyección, el diseño de moldes, la materia prima, condiciones de procesamiento y el rendimiento de la máquina de inyección debe estar bien controladas, y algunas defectos comunes:

como el tiro corto, encogimiento, deformación, marcas /golpes, entre otros podrían evitarse y / o disminuir significativamente (Chih-Cherng et al., 2009).

Para obtener la calidad requerida en el proceso productivo los parámetros óptimos determinados deben de repetirse de ciclo en ciclo de la forma más precisa que sea posible. Es por esto que el desarrollo del proyecto se enfocará en optimizar las condiciones de procesamiento, por lo que a continuación se hablará acerca de los parámetros que influyen en el proceso de moldeo por inyección.

## **2.4. Parámetros que influyen en el proceso de moldeo por inyección**

El moldeo por inyección es un proceso cíclico inestable, sin embargo, la selección apropiada de los parámetros para su correcta operación se hace más difícil conforme el diseño de la pieza de plástico se hace más delgada (Ko-Ta y Fu-Ping, 2006). Diversos estudios han encontrado que los parámetros que influyen durante el proceso de moldeo por inyección tienen efectos cruciales en la calidad de los productos (Ming-Tsan et al., 2009).

Algunos parámetros tales como la temperatura de inyección, temperatura del molde y el tiempo de inyección son muy importantes, ya que tienen relación directa con la calidad y el costo de los productos (Zhao et al., 2010). Otros parámetros como presión de inyección, temperatura del material fundido, velocidad de inyección y el tiempo de enfriamiento, son también variables a considerar dentro del mismo (Curic et al., 2012).

- a) Temperatura de inyección:** es la temperatura a la que se calienta el material para introducirlo en el interior del molde. La temperatura del material aumenta gradualmente desde que entra por la tolva hasta que se encuentra preparado para ser inyectado. Esta temperatura está en función del tipo de material, y no debe de ser superior a la temperatura a la que comienza a descomponerse,

pero debe ser suficientemente elevada para permitir que el material fluya correctamente.

- b) Temperatura del molde:** es la temperatura a la que se encuentra la superficie de la cavidad de moldeo. Debe ser suficientemente baja para enfriar el material fundido y conseguir el solidifique. La velocidad a la que se enfría el plástico es un factor muy importante puesto que va a condicionar la morfología del material, y por tanto sus propiedades físicas, mecánicas, ópticas, etc.
  
- c) Presión inicial o de llenado:** Es la presión que se aplica inicialmente al material fundido y que se desarrolla como consecuencia del movimiento hacia adelante del tornillo. Esta presión obliga a que el material fundido fluya hacia adelante, produciendo el llenado inicial del molde. En una situación ideal la presión inicial debe ser lo mayor posible, de modo que el llenado se produzca lo más rápidamente posible.
  
- d) Presión de mantenimiento o compactación:** Es la presión que se aplica al final de la inyección del material, cuando el molde se encuentra casi completamente lleno y cuando algunas partes del material han comenzado a enfriarse y contraerse, obliga a que el molde se acabe de llenar y se obtenga una pieza con una densidad uniforme.
  
- e) Presión posterior o de retroceso:** es la presión que se aplica al tornillo mientras retrocede, una vez finalizada la etapa de compactación. Una vez que el molde está completamente lleno el tornillo comienza a girar para plastificar más material para el siguiente ciclo. Este material comienza a alojarse delante del tornillo, obligando a que el tornillo retroceda, sin embargo no se permite que el tornillo retroceda libremente sino que se aplica una cierta presión posterior para conseguir que el material se mezcle y homogenice adecuadamente.

- f) **Tiempo de inyección inicial:** En la mayoría de las máquinas el tiempo de inyección se divide en dos: el tiempo de inyección inicial y el tiempo de mantenimiento. El tiempo de inyección inicial es el tiempo necesario para que el tornillo realice el recorrido hacia adelante, obligando a que el material se introduzca dentro del molde.
  
- g) **Tiempo de mantenimiento o compactación:** es el tiempo que, después de realizar la inyección inicial del material, el tornillo permanece en posición avanzada para mantener la presión del material dentro del molde. Este tiempo se prolonga hasta que la entrada a la cavidad del molde solidifica.
  
- h) **Tiempo de enfriamiento:** es una de las variables más importantes para conseguir una pieza de buena calidad. Es el tiempo que la pieza requiere para enfriarse hasta que se ha solidificado y además ha adquirido la rigidez suficiente para poder ser extraída del molde sin que se deforme. Las partes más externas de las piezas se enfrían a velocidades más rápidas (Sánchez, 2002).

Con el objetivo de lograr piezas de calidad, es preciso entender cómo influyen los parámetros como velocidades, presiones y temperaturas en el plástico y el comportamiento que éste tiene en el proceso de moldeo por inyección.

## **2.5. Comportamiento del material dentro del molde**

El flujo del polímero fundido en el moldeo por inyección resulta ser un problema muy complejo. Se trata del flujo de un líquido no newtoniano, es decir que su viscosidad puede llegar a variar seriamente con pequeñas variaciones en la velocidad del flujo, mientras más alta sea esta velocidad, provocará una disminución en la viscosidad del plástico, esto se manifiesta como una menor resistencia de flujo, además de ser compresible y que fluye a través de canales de geometría complicada, cuyas paredes están mucho más frías que el polímero. En la figura 2.4 se describen las diferentes etapas por las que pasa el material desde que entra a la cámara de plastificación hasta

que se extrae la pieza del molde y del efecto de las principales variables sobre las propiedades de la pieza moldeada (Sánchez, 2002).



**Figura 2. 4.** Comportamiento del material dentro del molde (Sánchez, 2002).

## 2.6. Problemas en el moldeo por inyección

Determinar los valores óptimos de los parámetros del proceso es una tarea compleja y difícil. Los defectos de los productos, tales como deformaciones, encogimiento, marcas de hundimiento, y la tensión residual, son causados por diversos factores durante el proceso de producción. Estos defectos influyen en la calidad y la precisión de los productos. Por lo tanto, es de suma importancia controlar eficazmente la influencia de los factores durante el proceso de moldeo (Curic et al., 2012). Diversas metodologías son utilizadas para la mejora continua y la optimización de recursos en los procesos de producción.

En la literatura se encuentran bastantes artículos relacionados con defectos que se originan en el proceso de moldeo. Wei Guo et al (2012) afirman que la deformación, que es el defecto causado por un cambio no uniforme de las tensiones internas, se considera que es uno de los más difíciles de controlar. Sin embargo, puede ser controlado por la optimización de la configuración de parámetros de proceso. Ko-Ta y Fu-Ping (2006) describen que en términos de calidad, la deformación y contracción son algunos de los defectos más comunes en la manufactura de productos termoplásticos en el proceso de moldeo por inyección. El nivel de deformación y la contracción está altamente relacionado con los parámetros de mecanizado de la operación.

Mustafa et al. (2009) encuentran que uno de los mayores defectos a enfrentar es la contracción, lo que deteriora la calidad de las piezas producidas y afirma que para controlar y reducir este defecto, la forma esencial es determinar perfectamente los parámetros de moldeo.

Shuaib et al. (2012) afirman que el problema que más destaca en la calidad de un producto de moldeo por inyección es la deformación. Chailly et al. (2007) dicen que el defecto de línea de soldadura aparece a menudo en el proceso de moldeo por



inyección e induce tanto a un defecto de calidad como a una debilidad mecánica local. Por otro lado Mathivanan y Parthasarathy (2009) sostienen que las marcas superficiales es uno de los defectos de la superficie a menudo encontrados en el moldeo por inyección. Es por eso que Hussin et al. (2013) concluye que varios defectos como la deformación, contracción, marcas superficiales o golpes y líneas de soldadura pueden ocurrir.

La rebaba también es uno de los defectos más comunes encontrados en la piezas, debido a un mal control en las temperaturas de barril, las cuales hacen que el material se dosifique en exceso y provoque un exceso de material en el cierre del molde. Así también otro defecto muy común, y mucho más serio, es el de las piezas incompletas, las cuales se producen principalmente por baja presión de inyección, produciendo una dosificación ineficiente y costos en desperdicio de material y energía. Por lo tanto Castillo (2007) afirma que los principales defectos que afectan una pieza de plástico fabricada por inyección son: pieza incompleta, pieza con rebaba y pieza rayada. Estos defectos se suman a otros que, no de manera frecuente, aparecen durante el proceso de fabricación de la pieza como burbujas combadura y marcas de expulsores.

El método experimental ha sido ampliamente utilizado por muchos investigadores para controlar los defectos y la optimización de un proceso de moldeo por inyección (Wei Guo et al, 2012) y debido a la complejidad del moldeo por inyección, numerosas propuestas y modelos matemáticos han sido ampliamente desarrollados ya que se han realizado numerosos estudios para el análisis de las diferentes etapas del proceso de moldeo por inyección (Ko-Ta y Fu-Ping, 2006).

## **2.7. Herramientas de la calidad**

Las herramientas de la calidad son comúnmente utilizadas para mejorar el aspecto del producto o el proceso (Kairong, 2010). Es por eso que para el desarrollo del proyecto será necesario utilizar algunas herramientas de la calidad.

En la tabla 2.3. se muestran las siete herramientas básicas de la calidad.



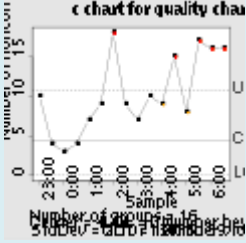
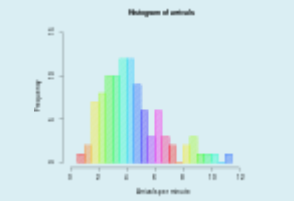
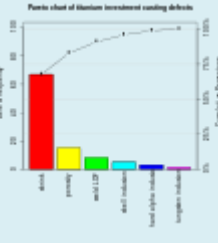
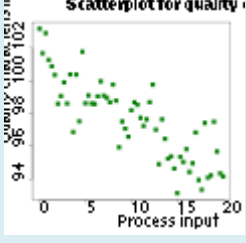

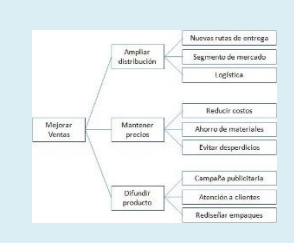
Diagrama de Ishikawa	Hoja de verificación	Gráfico de control	Histograma
			
Diagrama de Pareto	Diagrama de dispersión	Muestreo estratificado	Diagrama de árbol
			

Tabla 2. 3. Herramientas básicas de la calidad (Kairong, 2010)

## 2.8. Capacidad de proceso

Todos los procesos tienen una variabilidad estadística inherente que puede evaluarse por medio de métodos estadísticos. La mano de obra, las máquinas, los métodos, los materiales, y el medio ambiente presentan cada una su propia variación de tipo natural, y es la interacción de todas estas variaciones, la que determina la capacidad del proceso.

La capacidad del proceso es una propiedad medible que puede calcularse por medio del índice de capacidad del proceso o del índice de prestación del proceso. El resultado de esta medición suele representarse con un histograma que permite calcular cuántos componentes serán producidos fuera de los límites establecidos en la especificación (Mosquera-Artamonov et al, 2014).

### 2.8.1. Índices de capacidad de proceso

Los índices de capacidad de procesos (ICP) son un medio altamente efectivo de determinar la calidad del producto y desempeño del proceso, y son utilizados para el monitoreo y mejoramiento de dicho proceso. Entre muchos índices de capacidad de procesos desarrollados,  $C_p$ ,  $C_{pk}$ ,  $C_{pm}$  y  $C_{pkm}$  son los cuatro índices más populares bajo procesos distribuidos normalmente (Valdiviezo Márquez y Simón Fermín, 2010). En la tabla 2.4 se muestra la descripción de cada índice de capacidad. Se presupone que el resultado del proceso sigue una distribución normal.

Índice	Descripción
$\hat{C}_p = \frac{TS - TI}{6 \times \hat{\sigma}}$	Calcula lo que el proceso sería capaz de producir si el proceso estuviera centrado.
$\hat{C}_{pk} = \min \left[ \frac{TS - \hat{\mu}}{3 \times \hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu} - TI}{3 \times \hat{\sigma}} \right]$	Calcula lo que el proceso es capaz de producir si el objetivo del proceso está centrado entre los límites de la especificación. En caso de que la media del proceso no este centrada, $C_p$ sobreestima la capacidad del proceso. $C_{pk} < 0$ si la media del proceso se sitúa fuera de los límites de especificación.
$\hat{C}_{pm} = \min \left[ \frac{TS - \hat{\mu}}{3 \times \hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu} - TI}{3 \times \hat{\sigma}} \right]$	Calcula la capacidad del proceso respecto a un objetivo, T. $C_{pm}$ es siempre mayor que cero.
$\hat{C}_{pkm} = \frac{\hat{C}_{pk}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\hat{\mu} - T}{\hat{\sigma}}\right)^2}}$	Calcula la capacidad del proceso respecto a un objetivo, T válido para un proceso con una media descentrada.

**Tabla 2. 4.** Descripción de los índices de capacidad de procesos (Montgomery, 2004)

## 2.9. Diseño de experimentos

Se ha reconocido que es rentable aplicar métodos estadísticos en proyectos de mejora de calidad. En el siglo XX los métodos estadísticos que han sido desarrollados para este fin se han puesto en funcionamiento en forma de estrategias de mejora (Mast et al., 2000).

A estos métodos estadísticos se les conoce también como estrategias de mejora, las cuales son utilizadas para encontrar los componentes de variación y sus causas, a partir de un problema específico en la realización de un proceso. Por lo que una estrategia de mejora puede ser definida como “un conjunto coherente de medidas destinadas a mejorar el rendimiento de un proceso de identificación de las causas de la variación y la generación de acciones de mejora” (Mast et al., 2000). Tener variabilidad en el proceso de producción es inevitable debido a inconsistencia en los parámetros de la máquina, la pieza de trabajo, materiales y procesos (Jeang, 1999). Cuando existe variación en el proceso el diseño de experimentos es una técnica estadística utilizada para determinar el ajuste óptimo de los factores que afectan al proceso, y de esta manera mejorar su funcionamiento, reducir su variabilidad y mejorar la manufactura de productos (Antony y Antony., 2001). Los ajustes de los parámetros se considera que es un "arte negro", que se basa principalmente en la experiencia y el conocimiento de expertos e implica una gran cantidad de ensayo y error (Wei Guo et al, 2012), sin embargo, frente a la competencia global en el moldeo por inyección industrial, utilizar el método de ensayo y error para determinar los parámetros de proceso para la inyección moldeo ya no es lo suficientemente bueno (Mok y Kwong, 1999).

En la actualidad el diseño de experimentos es una herramienta que es utilizada para diseñar y analizar problemas complicados en procesos industriales. Es utilizado para entender las características del proceso y para investigar cómo las entradas afectan las respuestas basadas en antecedentes estadísticos, además de determinar los

parámetros óptimos del proceso con un menor número de ensayos de prueba (Ming-Tsan et al., 2009).

Se entiende el diseño de experimentos como “una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación”. Técnicamente, consiste en realizar una serie de pruebas en las que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida elegida. El diseño de experimentos es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores. Con esta técnica se puede conseguir entre otras, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir su variabilidad o los costos de producción. Todos los tipos de industrias se pueden beneficiar de la aplicación del diseño de experimentos, incluso aquellas de servicio (Tanco et al., 2009).

### **2.9.1. Diseño factorial $2^k$**

Los diseños factoriales se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. Hay varios casos especiales del diseño factorial general que son importantes debido a su uso generalizado en el trabajo de investigación y porque constituyen las bases de otros diseños de gran valor práctico.

El más importante de estos casos especiales es el de  $k$  factores, cada uno solo con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos, como dos valores de temperatura, presión o tiempo, o bien cualitativos, como dos máquinas, dos operadores, los niveles “alto” y “bajo” de un factor, o quizás la presencia o ausencia de un factor. Una réplica completa de este diseño requiere  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  observaciones y se le llama diseño factorial  $2^k$ .

El diseño  $2^k$  es de particular utilidad en las etapas iniciales del trabajo experimental, cuando probablemente se estén investigando muchos factores. Este diseño proporciona el menor número de corridas con las que pueden estudiarse  $k$  factores en

un diseño factorial completo. Por consiguiente, estos diseños se usan ampliamente en la selección de factores.

Puesto que sólo hay dos niveles para cada factor, se supone que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango elegido para los niveles de los factores. En muchos experimentos de tamizado de factores, cuando se acaba de iniciar el estudio del proceso o sistema, este supuesto suele ser razonable.

Existen diversos diseños  $2^k$ :

- a) **Diseño factorial  $2^2$** : Es el primer diseño que sólo tiene 2 factores, A y B, cada uno se corre a dos niveles. Los niveles de los factores pueden denominarse arbitrariamente “bajo” y “alto”. Las cuatro combinaciones de tratamientos suelen representarse con letras minúsculas.
- b) **Diseño factorial  $2^3$** : Es el diseño que tiene 3 factores; A, B y C, cada uno con dos niveles. La representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos puede hacerse con un cubo.

Para un diseño  $2^k$  el modelo completo contendría  $2^k - 1$  efectos. Las combinaciones de los tratamientos pueden escribirse en orden estándar introduciendo los factores uno a la vez y combinando sucesivamente cada nuevo factor con los que lo proceden. Por ejemplo, el orden estándar de un diseño  $2^4$  es *a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd, abcd*.

El enfoque general para el análisis estadístico del diseño  $2^k$  se describe, y suele emplearse un paquete de software de computadora en este proceso de análisis.

1. Estimar los efectos de los factores
2. Formar el moldeo inicial
3. Realizar las pruebas estadísticas
4. Refinar el modelo
5. Analizar los residuales
6. Interpretar los resultados

Durante la realización de estos pasos se llevan a cabo cálculos como:

- a) Estimación de efectos de los factores y examinar sus signos y magnitudes para obtener información preeliminar respecto a los factores y las interacciones que pueden ser importantes
- b) Utilización del análisis de varianza para probar formalmente la significación de los efectos principales y las interacciones
- c) Realización del análisis residual para verificar la adecuación del modelo y los supuestos.
- d) Determinación de análisis gráfico por medio de gráficas de los efectos principales o las interacciones, superficies de respuesta y gráficas de contorno.

### **2.9.2. Comparación de medias**

El análisis estadístico de los datos derivados de un experimento tiene como propósito proveer información referente a la manera en que las unidades experimentales responden a los tratamientos aplicados. El primer paso consiste en someter los datos a un análisis de varianza para establecer si hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos. El rechazo de la hipótesis nula de igualdad de medias en el análisis de varianza, conduce a preguntar cuáles diferencias entre las medias muestrales son las responsables del rechazo.

Para ello existen procedimientos de comparaciones múltiples entre todas las parejas de medias, que se usan aún cuando el objetivo sea seleccionar a los tratamientos con las mejores medias. Este objetivo es diferente y su resolución también. Los procedimientos de comparaciones múltiples de Tukey, Duncan y Dunnett son ampliamente usados en investigación agrícola y están descritos en numerosos libros de metodología estadística (García Villalpando et al., 2001).

### **2.9.3. Bloques aleatorizados**

En cualquier experimento la variabilidad que surge de un factor perturbador puede afectar los resultados, en general, un factor perturbador puede definirse como un factor del diseño que probablemente tenga un efecto sobre la respuesta, pero en el que no existe un interés específico. En ocasiones un factor perturbador es desconocido y no controlable; es decir, se desconoce la existencia de ese factor e incluso puede tener niveles variables mientras se está realizando el experimento. La aleatorización es la técnica de diseño que se utiliza para protegerse contra estos factores perturbadores. En otros casos el factor perturbador es conocido pero no controlable. Si por lo menos puede observarse el valor que asume el factor perturbador en cada corrida del experimento, es posible hacer la compensación correspondiente en el análisis estadístico mediante el uso del análisis de covarianza, mientras que cuando la fuente de variabilidad perturbadora es conocida y controlable, puede usarse una técnica de diseño llamada formación de bloques para eliminar de manera sistemática su efecto sobre las comparaciones estadísticas entre los tratamientos. La formación de bloques es una técnica de diseño en extremo importante que se utiliza ampliamente en la experimentación industrial.

El diseño de bloques completos aleatorizados es uno de los diseños experimentales más utilizados. Son numerosas las situaciones en las que es apropiado. Las unidades de equipo o maquinaria de prueba son con frecuencia diferentes en sus características de operación y serían un factor de formación de bloques típico. Lotes de materia prima, personas y el tiempo también son fuente de variabilidad perturbadora comunes en un experimento que pueden controlarse de manera sistemática mediante la formación de bloques.

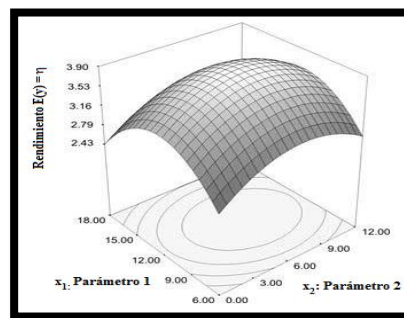
La formación de bloques también puede ser útil en situaciones que no incluyen necesariamente factores perturbadores como por ejemplo la materia prima, temperatura, operador, los cuales son más difíciles de controlar en proceso de gran escala (Montgomery, 2005).



### 2.9.4. Superficie de respuesta

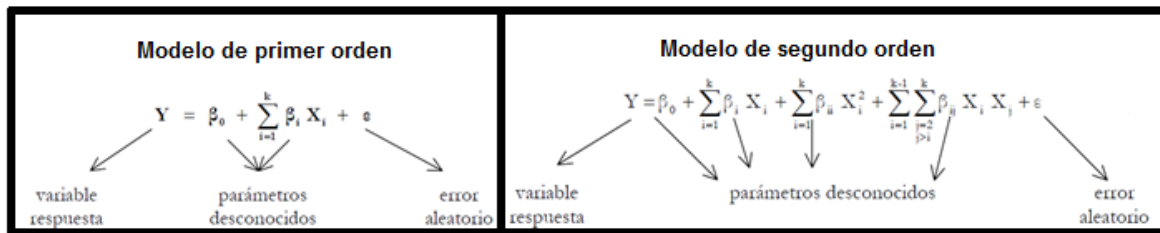
La metodología de superficie de respuesta o MSR es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problema ya que explora la relación entre los diversos parámetros de procesamiento y respuestas con los diversos criterios para analizar y modelar la forma en que la variable de interés es influenciada por otras. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta para después determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos, el cual se obtiene mediante el uso del diseño experimental y la aplicación de análisis de regresión. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta (Ko-Ta y Fu-Ping, 2006).

Es por esto que es uno de los métodos más ampliamente utilizados para resolver problemas de optimización en los entornos de fabricación (Oktem et al., 2005), ya que permite estimar las condiciones óptimas de operación de un proceso y mejorar significativamente su resultado en cuanto a costos, tiempos, eficiencia, productividad, cumplimiento de especificaciones y en fin, mejorar su calidad. En la superficie de respuesta  $\eta$  se gráfica contra los niveles de  $x_1$  y  $x_2$ , pero para ayudar a visualizar la forma de una superficie de respuesta, con frecuencia se grafican los contornos de la superficie de respuesta como se muestra en la figura 2.3. En la gráfica de contorno se trazan las líneas de respuesta constante en el plano  $x_1, x_2$ . Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta.



**Figura 2. 5.** Gráfica de contorno de una superficie de respuesta

En la mayoría de los problemas analizados mediante MSR, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto, el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre  $Y$  y el conjunto de variables independientes. Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es el modelo de primer orden. Si hay curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de orden superior tal como el modelo de segundo orden. La forma general de cada modelo se presenta en la figura 2.6.



**Figura 2. 6.** Forma general del modelo de primer orden y segundo orden

Cuando se está en un punto de la superficie de respuesta que está apartado del óptimo, el sistema presenta una curvatura moderada y el modelo de primer orden será el apropiado. El objetivo en este caso es llevar al experimentador de manera rápida y eficiente por la trayectoria del mejoramiento el área general del óptimo. Una vez que se ha encontrado la región óptima puede emplearse un modelo más elaborado como el de segundo orden, y llevarse a cabo un análisis para localizar el óptimo.

El objetivo último de la MSR es determinar las condiciones de operación óptimas del sistema o determinar una región del espacio de los factores en la que se satisfagan los requerimientos de operación (Montgomery, 2005).

## 2.10. Software

Para realizar los análisis y cálculos anteriormente explicados, suele emplearse un paquete de software de computadora.

Minitab es un programa estadístico de uso general con una amplia gama de análisis, buenos gráficos, con aceptables procedimientos para generar datos aleatorios, y un lenguaje de comandos de macro con el control del programa flexible. Minitab es un excelente paquete de enseñanza de la estadística y para la introducción a los métodos de remuestreo (Butler et al., 2003).

## 2.11. Análisis de estudios previos

A continuación se presentan dos estudios previos donde se utilizó el diseño de experimentos con base a la metodología de superficie de respuesta para mejorar el aspecto de una parte moldeada por inyección

**Estudio previo 1:** Chih-Cherng et al. (2009) realizaron un análisis y modelación de los parámetros que influyen en la variación de contracción de la pieza moldeada por inyección, utilizando la metodología de superficie de respuesta. En este estudio la velocidad de inyección, la presión, la temperatura del molde y la temperatura de la mezcla fueron seleccionadas como los parámetros significativos en el proceso de moldeo por inyección mientras que las observaciones de la variación de contracción en la pieza moldeada se consideraron como respuestas.

El plan del diseño de experimento consiste en 30 corridas. La porción factorial es un diseño factorial completo con todas las combinaciones de los parámetros en dos niveles y consta de seis puntos centrales y ocho puntos de estrella. Los datos obtenidos fueron analizados mediante gráficas de superficie de respuesta y gráficas de contorno, además el análisis de varianza (ANOVA) fue utilizado para encontrar el efecto significativo de las variables en la respuesta estudiada.

Resultados: Los modelos propuestos son suficientes para explicar el efecto de los parámetros de procesamiento independientes en la variación de la contracción de la

pieza moldeada a través del procedimiento eficaz de la metodología de superficie de respuesta. Los gráficos en 3D para la respuesta fácilmente revelan el rango de variación de la contracción cuando los factores varían. El nivel óptimo de la velocidad de inyección, el embalaje de presión, temperatura del molde, y la temperatura de la mezcla son 20%, 40%, 40 ° C, y 220,34 ° C, respectivamente. Los valores mínimos de la variación de la contracción obtenidos en la condición óptima, tanto en la dirección transversal y longitudinal eran 0,081 y 0,286 mm, respectivamente.

**Estudio 2:** Ko-Ta y Fu-Ping (2006) presentan una metodología para analizar la deformación y la contracción en una parte moldeada por inyección. La metodología de superficie de respuesta es aplicada para identificar el efecto significativo de los parámetros de la máquina; como temperatura del molde, presión y tiempo de compactación y tiempo de enfriamiento durante el proceso. En este estudio, la aproximación del modelo cuadrático se propuso utilizando el modelo de regresión de segundo orden también llamado modelo cuadrático. Los datos necesarios para la construcción del modelo de respuesta se obtienen generalmente por el diseño experimental. Se desarrolla un diseño factorial completo con todas las combinaciones de los factores en dos niveles (alto y bajo).

Los resultados de ANOVA y la realización de experimentos muestran que los modelos cuadráticos de la contracción y la deformación están bastante bien equipados con los valores experimentales. Las influencias de todos los parámetros de mecanizado en las actuaciones de la contracción y la deformación han sido analizadas por los modelos matemáticos obtenidos.

Resultados: En la tabla 2.5. se comparan los valores iniciales de los parámetros estudiados con los valores óptimos obtenidos, con éstos nuevos valores la reducción en porcentaje del defecto de deformación y contracción es de 37.8% y 53.9% respectivamente.

Parámetro	Unidad	Valor inicial	Valor óptimo
Temperatura del molde	°C	50	51.7
Tiempo de compactación	seg	1.5	1.72
Presión de compactación	MPa	125	128
Tiempo de enfriamiento	seg	7	7.81
Contracción	%	3.507	2.179
Deformación	mm	0.252	0.116

**Tabla 2. 5.** Resultados obtenidos estudio 2

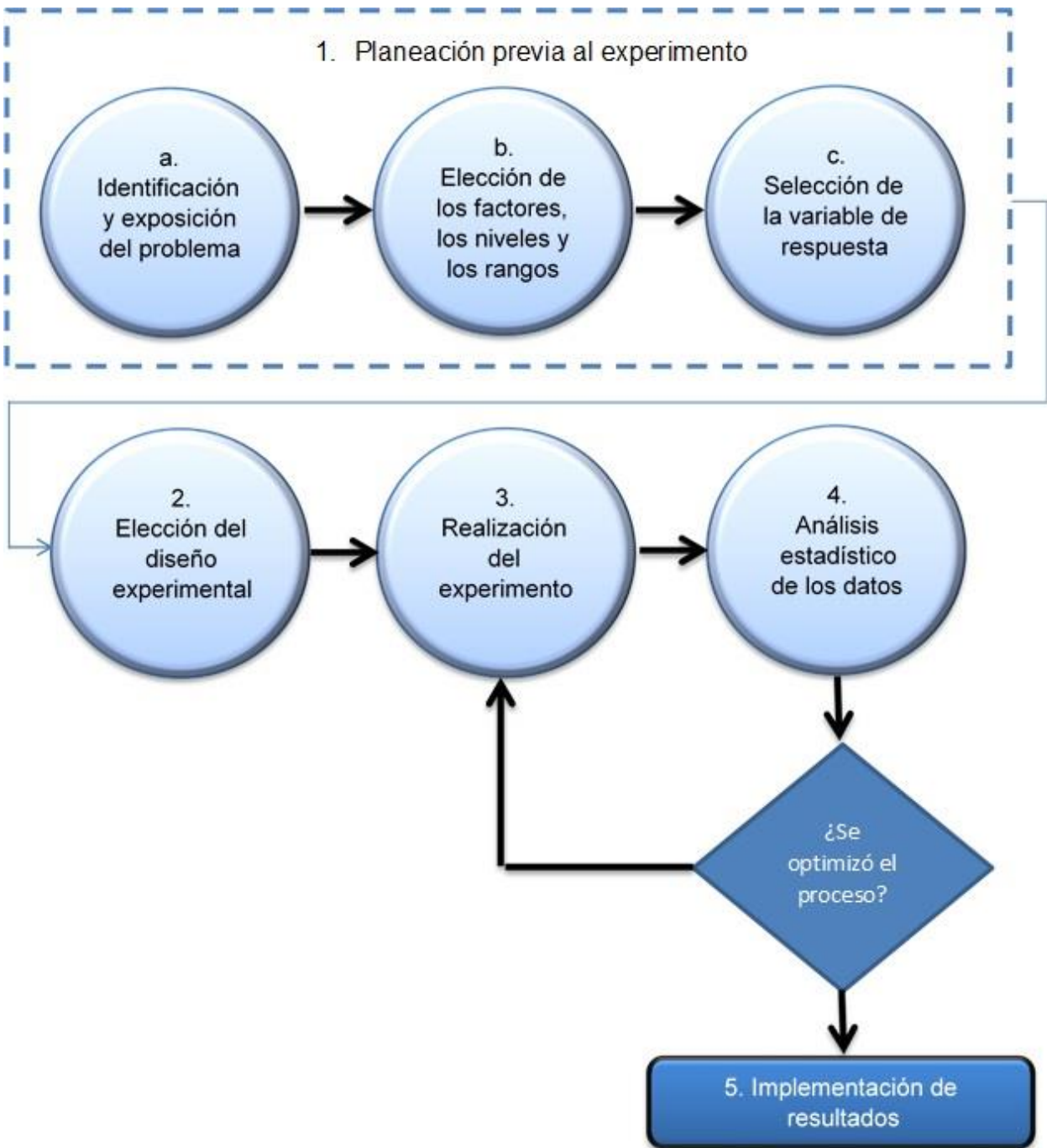
### 3. METODOLOGÍA

En el capítulo anterior se describen los parámetros que influyen durante un proceso de moldeo por inyección y la relación que tiene cada uno de ellos con la calidad del producto, además de hacer referencia a todo tipo de defectos que se presentan durante el mismo. Es por eso que es importante identificar y controlar aquellos parámetros que afectan directamente a la calidad de la pieza estudiada.

La metodología utilizada se sustenta en el análisis realizado en el capítulo 2, donde se explica que la utilización de un diseño de experimentos desempeña un papel importante en el mejoramiento de procesos. En un experimento, el interés suele centrarse en determinar las variables del proceso que afectan la respuesta. El siguiente paso es la optimización, es decir, determinar la región de los factores importantes que conduzca a la mejor respuesta posible. Cuando no se conoce la verdadera superficie de respuesta la utilización de métodos experimentales es importante para optimizar el proceso.

Para aplicar el enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento es necesario que todos los que participan en el mismo tengan desde el principio una idea clara de qué es exactamente lo que va a estudiarse, como van a recolectarse los datos, y al menos una comprensión cualitativa de la forma en que van a analizarse los datos.

Un experimento exitoso requiere conocer los factores importantes, los rangos en los que deberán hacerse variar estos factores, el número de niveles que deberán usarse y las unidades de medición apropiadas para estas variables. En general la experimentación se hace de manera secuencial y, como regla general, no deberá invertirse más de 25% de los recursos disponibles en el primer experimento. También así, antes de comenzar con el experimento se debe de cerciorar que los instrumentos de medición y la máquina con la que se va a trabajar están dentro de período de calibración y mantenimiento, esto ayudará a que la variable de respuesta sea más exacta y el error de medición disminuya.



**Figura 3. 1.** Metodología para realizar un diseño de experimentos (basado en Montgomery, 2005)

En la figura 3.1. se muestra el esquema general del procedimiento para diseñar un experimento el cual comprende 5 pasos los cuales se describen a continuación:

### **3.1. Planeación previa al experimento**

La planeación previo al experimento se divide en 3 puntos importantes que se deben considerar, la mayor parte de éxito gravitará en torno al desarrollo adecuado éstos.

#### **a) Identificación y exposición del problema**

Identificar los indicadores que estén afectando de manera significativa al proceso. Algunos de ellos pueden ser la cantidad de re trabajos que se realizan, tiempo de re trabajo invertido, cantidad de rechazos externos recibidos en un periodo de tiempo, piezas defectuosas por corrida y porcentaje de desperdicio por corrida.

La utilización de algunas herramientas de la calidad como el diagrama de Pareto, un histograma o un diagrama de dispersión son importantes para identificar y clarificar el problema. La hoja de verificación es también una herramienta que se utilizará para identificar el defecto que se presenta con mayor frecuencia durante las corridas

Es necesario desarrollar todas las ideas acerca de los objetivos del experimento, así mismo, es conveniente hacer una lista de los problemas o las preguntas específicas que van a abordarse mediante una lluvia de ideas o diagrama de árbol.

#### **b) Elección de los factores, los niveles y los rangos**

Seleccionar los factores potenciales del diseño, es decir, aquellos que pueden influir en el desempeño del proceso y que se hacen variar en el experimento y clasificarlos en factores que se mantienen constantes y factores a los que se permiten variar. Es importante también determinar cuáles son los factores perturbadores.

Una vez que se eligieron los factores del experimento, se deben determinar los rangos en los que se harán variar a estos, así como los niveles específicos con los que se realizarán las corridas. También deberá determinarse como van a controlarse estos factores en los valores deseados y cómo van a medirse.



### c) Selección de la variable de respuesta

Seleccionar la variable de respuesta que se quiera mejorar y/o optimizar en el proceso y al elegirla se debe de tener la certeza de que esta variable proporciona información útil acerca del mismo. Dentro del experimento el promedio o la desviación estándar de la característica medida será la variable de respuesta.

## 3.2. Elección del diseño de experimento

Implica la consideración del tamaño de la muestra, es decir, el número de réplicas, además de la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación de usar la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización.

El método a utilizar será la superficie de respuesta, donde el rendimiento del proceso es una función de los niveles de los parámetros:

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (3.1)$$

donde  $\varepsilon$  representa el ruido o error observado en la respuesta  $y$ . Si la respuesta esperada se denota por  $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ , entonces a la superficie representada por

$$\eta = f(x_1, x_2), \quad (3.2)$$

se le llama superficie de respuesta.

En la mayoría de los problemas de superficie de respuesta, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida, por lo tanto, el primer paso es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre “ $y$ ” y el conjunto de variables independientes. Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es el modelo de primer orden. Si hay curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de orden superior tal como el modelo de segundo orden.

La ecuación del modelo de primero orden en forma matricial es:

$$Y = X \beta + \varepsilon \quad (3.3)$$

donde la matriz  $X$  puede escribirse alternativamente como  $X = [1 \ D]$ , con  $D$  la matriz de combinaciones de niveles de los factores, denominada matriz de diseño.

Si la matriz  $X$  es de rango completo, entonces el estimador de  $\beta$  obtenido por el método de mínimos cuadrados es  $b = (X' X)^{-1} X' Y$ , y la matriz de varianzas-covarianzas de  $b$  viene dada por  $\text{Var}(b) = (X' X)^{-1} \sigma^2$

El modelo de primer orden ajustado es, entonces:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i \quad (3.4)$$

Si el modelo está bien ajustado, la parte no aleatoria del modelo representa la respuesta real esperada y  $\varepsilon$  es el error experimental. Sin embargo, si el modelo no está ajustado a la función respuesta real, lo que ocurre cuando la relación entre la respuesta y los factores está demasiado simplificada,  $\varepsilon$  contiene, además del error experimental, una parte de error no aleatorio que se debe a la falta de ajuste.

Cuando existe curvatura en la superficie de respuesta, el modelo de primer orden no es una aproximación adecuada y es necesario utilizar un modelo que ajuste mejor. Se emplea entonces un modelo de segundo orden.

De manera análoga a como se hizo para los modelos de primer orden se obtiene que el modelo ajustado de segundo orden es:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{\substack{j=2 \\ j>i}}^k b_{ij} X_i X_j \quad (3.5)$$

Cuando se está en un punto de la superficie de respuesta que está apartado del óptimo, el sistema presenta una curvatura moderada y el modelo de primer orden será

el apropiado. El objetivo en esta caso es llevar al experimentador de manera rápida y eficiente por la trayectoria del mejoramiento al área general del óptimo. Una vez que se ha encontrado la región óptima puede emplearse un modelo más elaborado como el de segundo orden, y llevarse a cabo un análisis para localizar el óptimo.

### **3.3. Realización del experimento**

- Como se mencionó anteriormente, antes de comenzar el experimento se debe asegurar que los instrumentos de medición que se utilizarán están dentro de período de calibración. Así mismo la máquina con la que se trabajará debe de estar dentro de calibración y de período de mantenimiento.
- Durante la realización del experimento es importante monitorear el proceso con el fin de asegurarse de que todo se esté haciendo conforme a la planeación.
- Realizar algunas corridas piloto o de prueba las cuales proporcionarán información acerca de la consistencia del material experimental, una comprobación del sistema de medición y una idea aproximada del error experimental.
- Realización del experimento completo  $2^k$

### **3.4. Análisis estadístico de los datos**

- Utilizar métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos.
- Ingresar la información en el software Minitab para el análisis de los datos de manera estadística para obtener algunos datos importantes como la media, desviación estándar,  $C_p$  y  $C_{pk}$ .
- Diseñar métodos gráficos simples para para el análisis e interpretación de los datos.
- Realización del análisis residual y verificación de la adecuación del modelo.

Las técnicas estadísticas aunadas a una buena ingeniería o conocimiento del proceso y el sentido común llevarán a conclusiones sólidas

### **3.5. Implementación de resultados**

Una vez que se han analizado los datos se deben de sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso en acción. La utilización de métodos gráficos serán útiles en esta etapa, en particular para presentar resultados. Estos resultados deben de ser documentados e implementados en el proceso.

# 4. IMPLEMENTACIÓN

## 4.1. Planeación previa al experimento

De acuerdo a la figura 4.1 el diámetro de los orificios 1 y 2 de la pieza 1-1532082-9 debe de cumplir con la siguiente especificación:

Especificación de diámetro	
Mínima	0.118 mm
Máxima	0.122 mm

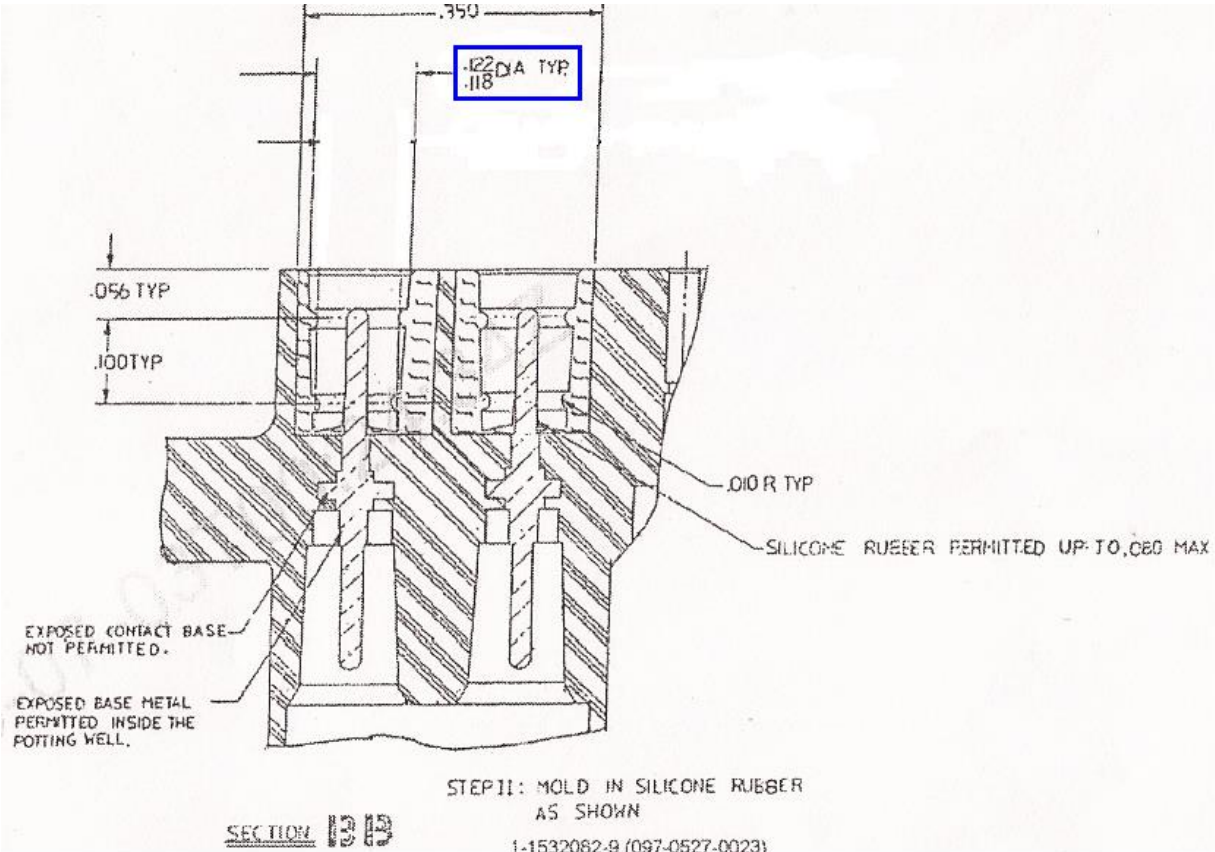
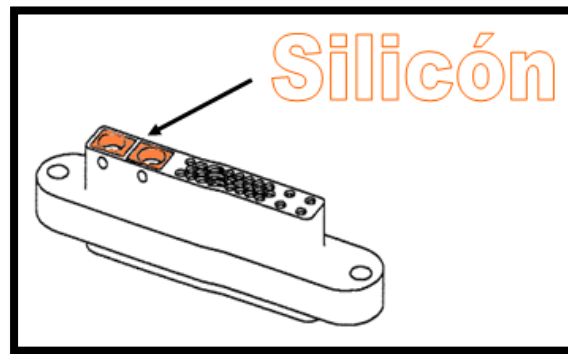


Figura 4. 1. Plano de especificación de calidad de la pieza 1-1532082-9

Además de cumplir con la especificación de calidad de medición del diámetro, también se debe de verificar que la pieza esté libre de exceso de silicón y que se vea de acuerdo a la figura 4.2. Si la pieza no cumple con el estándar de calidad del moldeo, ésta deberá ser re trabajada o en su defecto rechazada para formar parte del desperdicio general.



**Figura 4. 2.** Ayuda visual para aceptar o rechazar una pieza moldeada

#### a) Identificación y exposición del problema

En la figura 4.3 se presentan imágenes de piezas que no cumplen con el estándar de calidad del moldeo. Las piezas que salen incompletas o dañadas del silicón en el área de los pines deberán estar correctamente identificadas y separadas para re trabajarse de acuerdo al centro de trabajo CT20904, previamente establecido.



**Figura 4. 3.** Imágenes de piezas no aceptables

Además, para identificar y definir el problema crítico para la especificación del diámetro se recolectaron los datos de 3 días de producción, los cuales se muestran en la tabla 4.1

Producción día 1			Producción día 2			Producción día 3		
Pieza	Orificio 1	Orificio 2	Pieza	Orificio 1	Orificio 2	Pieza	Orificio 1	Orificio 2
1	0.1174	0.1184	1	0.1189	0.1187	1	0.1177	0.1178
2	0.1176	0.1180	2	0.1179	0.1183	2	0.1168	0.1180
3	0.1162	0.1189	3	0.1182	0.1178	3	0.1173	0.1183
4	0.1165	0.1185	4	0.1174	0.1182	4	0.1178	0.1180
5	0.1175	0.1174	5	0.1181	0.1183	5	0.1185	0.1190
6	0.1188	0.1180	6	0.1187	0.1175	6	0.1175	0.1178
7	0.1174	0.1176	7	0.1173	0.1185	7	0.1179	0.1182
8	0.1178	0.1181	8	0.1173	0.1164	8	0.1184	0.1190
9	0.1164	0.1189	9	0.1177	0.1184	9	0.1178	0.1189
10	0.1173	0.1183	10	0.1187	0.1183	10	0.1182	0.1166
11	0.1175	0.1188	11	0.1168	0.1173	11	0.1171	0.1190
12	0.1179	0.1180	12	0.1163	0.1183	12	0.1187	0.1180
13	0.1162	0.1170	13	0.1186	0.1173	13	0.1184	0.1188
14	0.1186	0.1180	14	0.1178	0.1186	14	0.1171	0.1186
15	0.1174	0.1189	15	0.1170	0.1186	15	0.1184	0.1177
16	0.1173	0.1173	16	0.1175	0.1185	16	0.1186	0.1187
17	0.1184	0.1183	17	0.1182	0.1178	17	0.1180	0.1184
18	0.1180	0.1190	18	0.1175	0.1178	18	0.1177	0.1191
19	0.1184	0.1189	19	0.1188	0.1186	19	0.1188	0.1184
20	0.1178	0.1175	20	0.1186	0.1187	20	0.1176	0.1186
21	0.1174	0.1181	21	0.1186	0.1183	21	0.1183	0.1175
22	0.1168	0.1179	22	0.1171	0.1188	22	0.1189	0.1176
23	0.1178	0.1180	23	0.1189	0.1172	23	0.1183	0.1177
24	0.1186	0.1186	24	0.1171	0.1183	24	0.1176	0.1188
25	0.1184	0.1164	25	0.1165	0.1187	25	0.1172	0.1180
26	0.1179	0.1183	26	0.1174	0.1179	26	0.1172	0.1172
27	0.1188	0.1181	27	0.1174	0.1181	27	0.1175	0.1186
28	0.1179	0.1182	28	0.1167	0.1188	28	0.1187	0.1185
29	0.1170	0.1185	29	0.1189	0.1177	29	0.1188	0.1175
30	0.1187	0.1174	30	0.1172	0.1186	30	0.1172	0.1182

**Tabla 4. 1.** Datos obtenidos en 3 días de producción

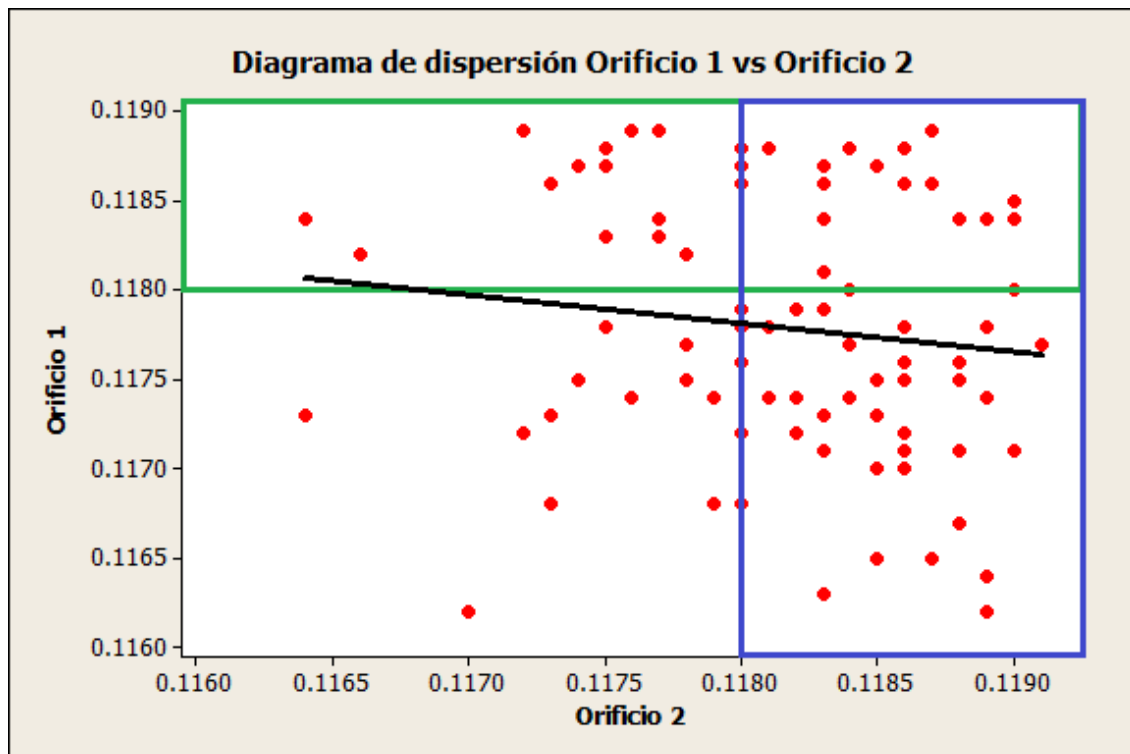
El diagnóstico gráfico consiste en la utilización de las siguientes herramientas estadísticas para los 90 datos obtenidos en los 3 días de producción.

1. Diagrama de dispersión
2. Histograma
3. Gráficas de control de lecturas individuales y rango móvil
4. Estudio de capacidad de proceso

### Diagrama de dispersión Orificio 1 vs Orificio 2

Se elaboró un diagrama de dispersión con los 90 datos obtenidos de los 3 días de producción anteriormente documentados. En la figura 4.4, se muestra la no existencia de correlación al no presentarse patrón entre las dos variables, y se puede decir que las variables tienden a ser independientes.

Sólo el 16% de los puntos están dentro del área de especificación, es decir, donde ambos orificios cumplen con la especificación de calidad y son piezas aceptables.



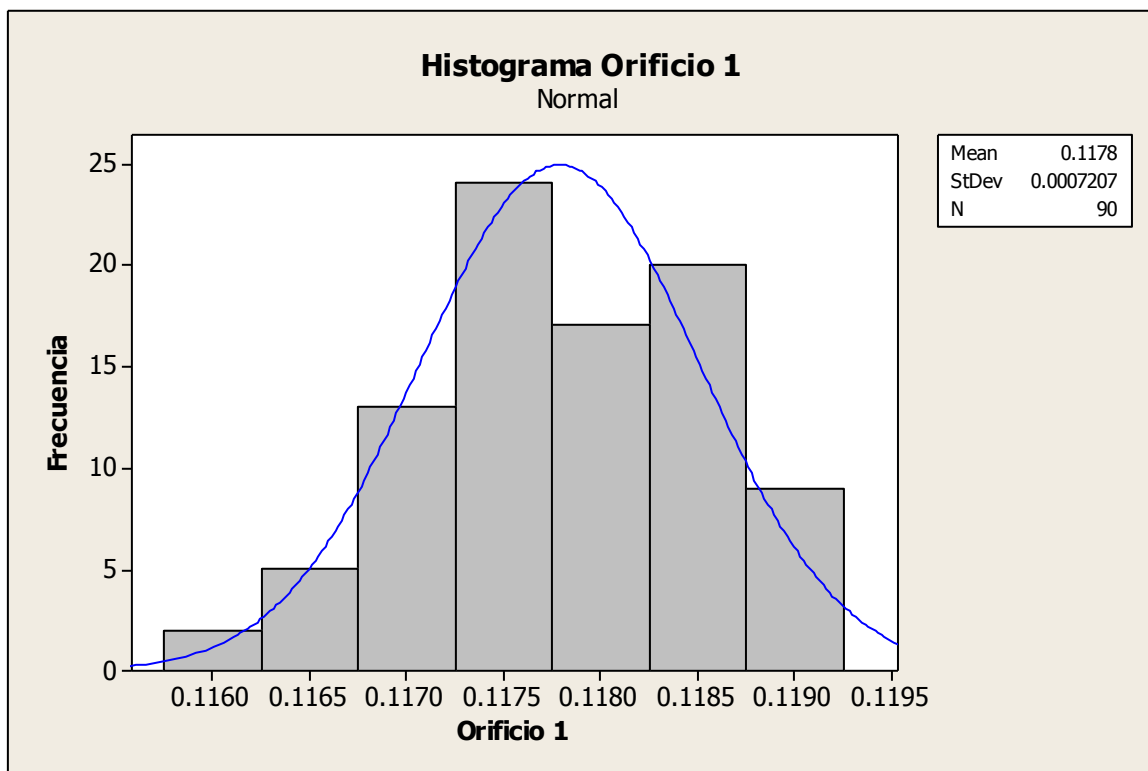
**Figura 4. 4.** Diagrama de dispersión Orificio 1 vs Orificio 2



### Gráficos de 3 días producción: Orificio 1

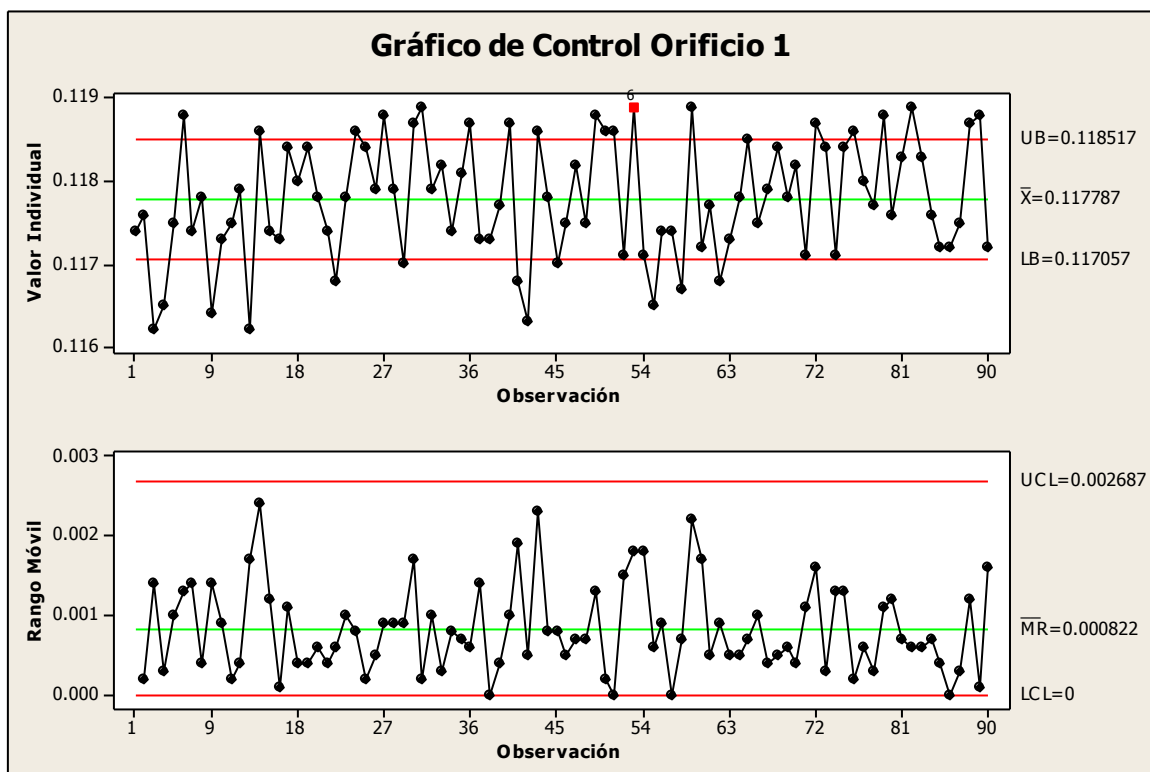
Como se muestra en la figura 4.5, se elaboró un histograma con los 90 datos recolectados de 3 días de producción consecutivos, en el cual se tomó como variable crítica la dimensión requerida de acuerdo a especificación del orificio 1. En el histograma se visualizan los siguientes puntos:

- Se identifica un tipo de curva con mezcla de normales, teniendo datos cargados a la izquierda de la curva
- Se identifica una desviación estándar de 0.0007 mm
- Se identifica una media de 0.1178



**Figura 4. 5.** Histograma del Orificio 1 de 3 días de producción

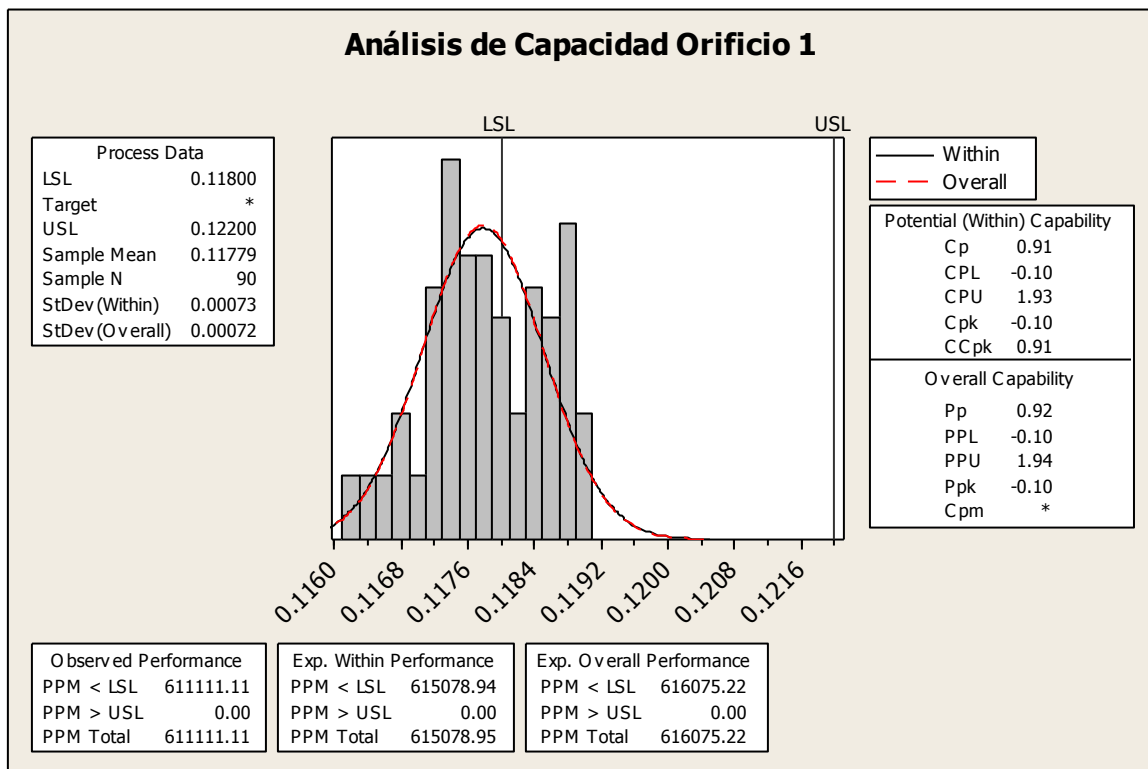
Para conocer el comportamiento de la variación durante el proceso se realizó una gráfica de control tipo lecturas individuales y rango móvil 2. El resultado de la gráfica 4.6 muestra que el proceso no está bajo control estadístico, se observan varios puntos consecutivos con tendencia a estar fuera de control. Se realizaron las 8 pruebas para encontrar causas especiales y se identificó que el gráfico falla en la prueba 6, donde 4 de 5 puntos están a más de 1 desviación estándar de la línea central (de un lado de la línea central). La prueba falla en el punto 53.



**Figura 4. 6.** Gráfica de control Orificio 1 de 3 días de producción

Se realiza un análisis de capacidad de proceso, y de acuerdo al gráfico 4.7 se concluye lo siguiente:

- El comparativo que se realiza respecto a las especificaciones del producto nos indica que existe un 61% de las piezas que no cumplen con las especificaciones
- El índice tanto de  $C_p$  como de  $C_{pk}$  refuerzan lo anterior al obtenerse valores de  $C_p = 0.91$  y  $C_{pk} = -0.10$ .
- Las partes por millón totales de no conformidad es de 611,111 piezas, las cuales están por debajo de la especificación inferior.



**Figura 4. 7.** Análisis de capacidad de proceso del Orificio 1 de 3 días de producción

### Gráficos de 3 días de producción: “Orificio 2”

Como se muestra en la figura 4.8, se elabora un histograma con los 90 datos del orificio 2, recolectados en 3 días de producción consecutivos, en el cual se tomó como variable crítica la dimensión requerida de acuerdo a especificación del orificio 2. En el histograma se visualizan los siguientes puntos:

- Se identifica una curva con cierto grado de distribución normal y se tienen algunos datos mayor o igual al límite inferior de especificación ( $\geq 0.118$  mm)
- Se identifica una desviación estándar de 0.00059 mm
- Se identifica una media de 0.118

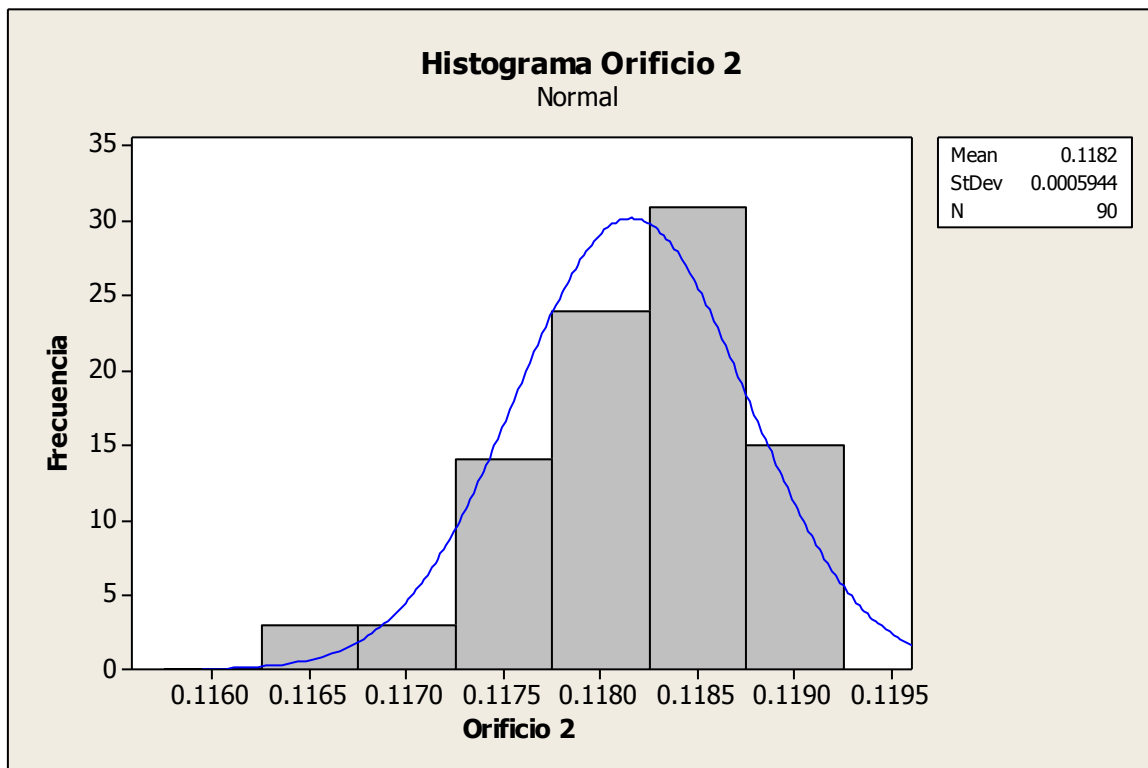
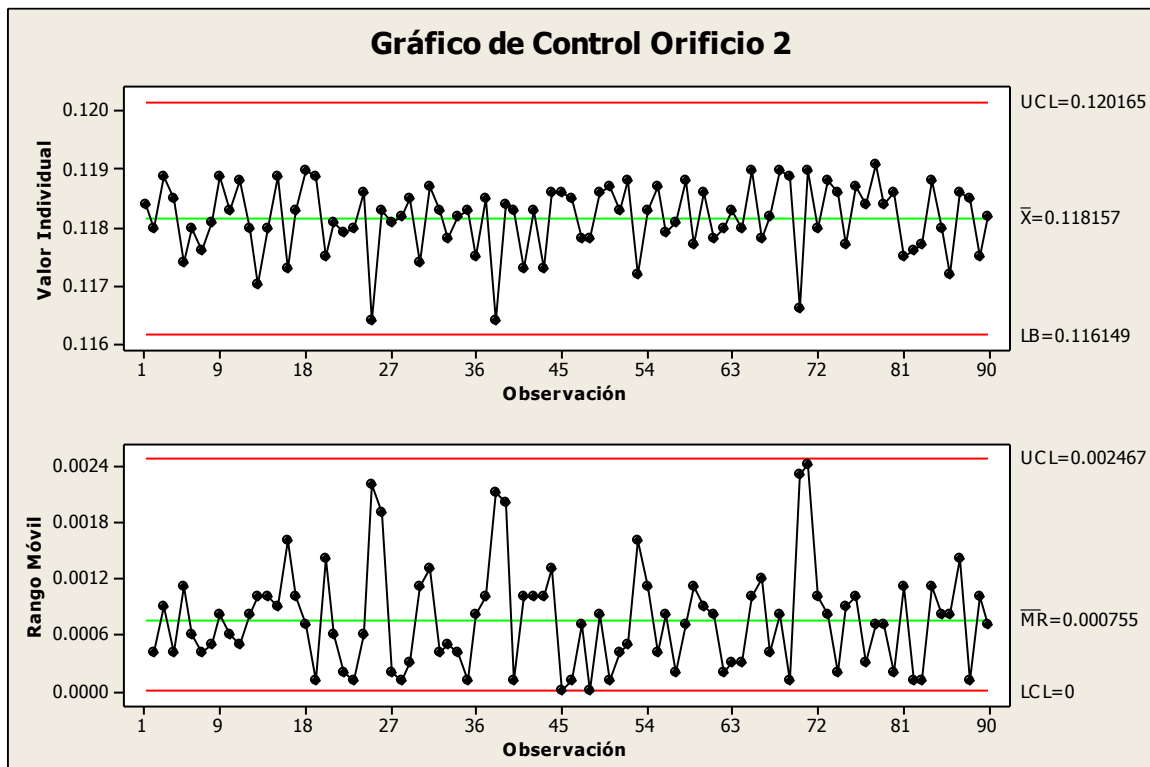


Figura 4. 8. Histograma del Orificio 2 de 3 días de producción

Como se muestra en la figura 4.9, para conocer el comportamiento de la variación durante el proceso se construyó una gráfica de control tipo lecturas individuales y rango móvil 2. El resultado de la gráfica 4.9 muestra que el proceso está bajo control estadístico, donde la variación se debe a la presencia de causas comunes. Los resultados para la gráfica de lecturas individuales se especifican en la tabla 4.2.



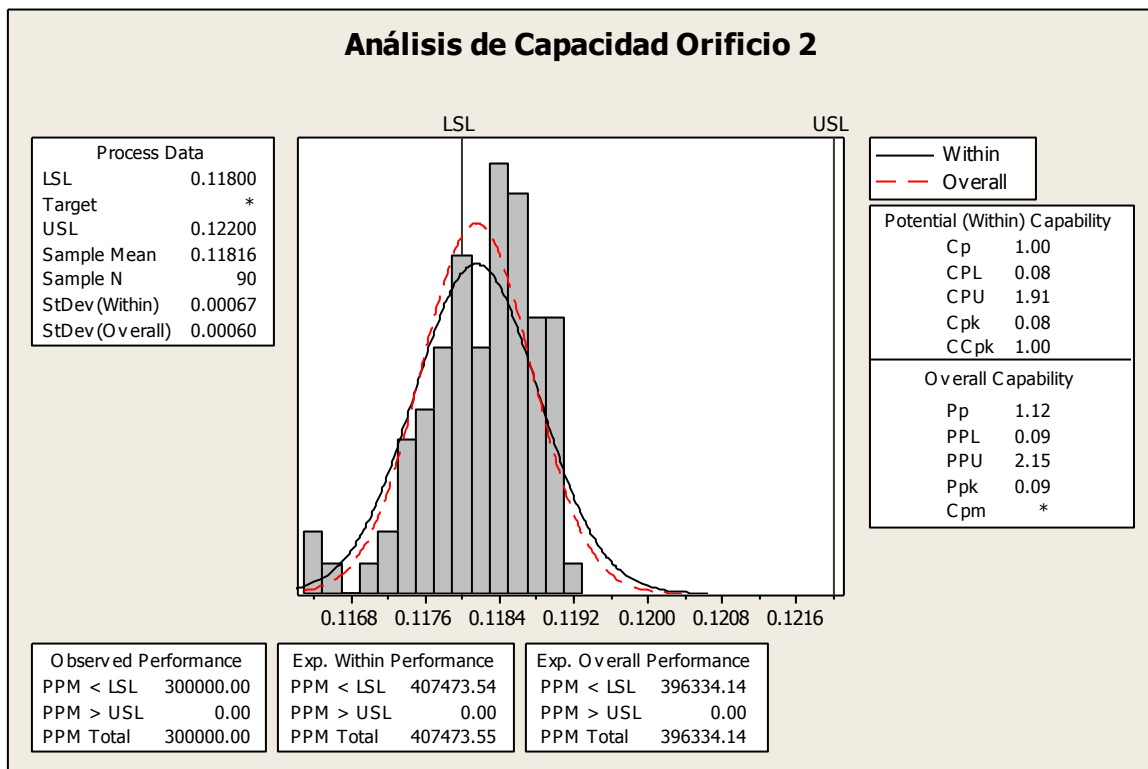
*Figura 4. 9. Gráfico de control del Orificio 2 de 3 días de producción*

	Lecturas individuales	Rango Móvil 2
<b>LSC</b>	.120	.002
<b>LC</b>	.118	.0007
<b>LIC</b>	.116	0

*Tabla 4. 2. Resultados gráfico de control del Orificio 2*

Se realiza un análisis de capacidad de proceso, y de acuerdo al estudio se concluye lo siguiente. Ver figura 4.10

- El comparativo que se realiza respecto a las especificaciones del producto nos indica que existe un 30 % de las piezas que no cumplen con las especificaciones
- El índice tanto de  $C_p$  como de  $C_{pk}$  refuerzan lo anterior al obtenerse valores de  $C_p = 1.00$  y  $C_{pk} = 0.08$ .
- Las partes por millón totales de no conformidad es de 300,000 piezas, las cuales están por debajo de la especificación inferior.



**Figura 4. 10.** Análisis de capacidad de proceso del orificio 2 de 3 días de producción

### b) Elección de los factores, los niveles y los rangos

El criterio utilizado para establecer los factores tipo constantes o variables se llevó a cabo por medio de una entrevista con el Ingeniero de Moldeo, especialista y responsable del proceso de moldeo. En la tabla 4.3 y 4.4 se muestran los factores que intervienen en el proceso y se clasifican en factores constantes o variables.

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

*Tabla 4. 3. Factores constantes que intervienen en el proceso de moldeo*

<b>Factores variables</b>	<b>Especificación Inferior</b>	<b>Especificación Superior</b>
<b>Temperatura por arriba del molde</b>	450°F	480°F
<b>Temperatura por abajo del molde</b>	450°F	480°F
<b>Tiempo de inyección</b>	1 min	3 min
<b>Tiempo de enfriamiento</b>	1 min	3 min
<b>Velocidad de inyección</b>	1.5 in/seg	2.5 in/seg
<b>Presión</b>	1 bar	1.8 bar

*Tabla 4. 4. Factores variables que intervienen en el proceso de moldeo*

### c) Selección de la variable de respuesta

La variable de respuesta que se requiere mejorar en el proceso es la característica de calidad definida como: diámetro de los orificios 1 y 2 de la pieza, para que éstos cumplan con la especificación que se exige de acuerdo al diseño y plano de la pieza.

## 4.2. Elección del diseño de experimento

Para analizar el primer problema que se tiene en el proceso de moldeo por inyección, se realiza un primer diseño de experimentos llamado “corrida de exploración”, en el cual se bloquearon la temperatura en 460°F y la presión en 1.6 para obtener piezas completas y de esta manera poder medir la circunferencia de los diámetros de los orificios. El diseño es un experimento  $2^3$  y contiene 5 corridas que se realizan en los puntos centrales de los parámetros.

## 4.3. Realización del experimento

En la tabla 4.5 se presenta el diseño de experimentos que se llevó a cabo

Orden Est	Orden Corrida	Pt Central	Bloques	A	B	C	Velocidad de inyección	Tiempo de inyección	Tiempo de enfriamiento
5	1	1	1	-1	-1	1	1.5	1	4
10	2	1	1	1	-1	-1	2.5	1	2
14	3	1	1	1	-1	1	2.5	1	4
4	4	1	1	1	1	-1	2.5	3	2
15	5	1	1	-1	1	1	1.5	3	4
11	6	1	1	-1	1	-1	1.5	3	2
9	7	1	1	-1	-1	-1	1.5	1	2
21	8	0	1	0	0	0	2.0	2	3
18	9	0	1	0	0	0	2.0	2	3
17	10	0	1	0	0	0	2.0	2	3
16	11	1	1	1	1	1	2.5	3	4
20	12	0	1	0	0	0	2.0	2	3
19	13	0	1	0	0	0	2.0	2	3

**Tabla 4. 5.** Corrida de exploración



#### 4.4. Análisis estadístico de los datos

Después de realizar el primer diseño de experimentos o corrida de exploración, se midió el diámetro de los orificios 1 y 2 de cada pieza, los cuales se muestran en la tabla 4.6.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	A	B	C	Orificio 1	Orificio 2
5	1	1	1	-1	-1	1	0.1173	0.1173
10	2	1	1	1	-1	-1	0.1173	0.1183
14	3	1	1	1	-1	1	0.1176	0.1184
4	4	1	1	1	1	-1	0.1169	0.118
15	5	1	1	-1	1	1	0.1174	0.1189
11	6	1	1	-1	1	-1	0.1178	0.119
9	7	1	1	-1	-1	-1	0.1182	0.1189
21	8	0	1	0	0	0	0.1173	0.1181
18	9	0	1	0	0	0	0.1159	0.1194
17	10	0	1	0	0	0	0.1165	0.118
16	11	1	1	1	1	1	0.1163	0.1186
20	12	0	1	0	0	0	0.1171	0.1164
19	13	0	1	0	0	0	0.1173	0.1173

**Tabla 4. 6.** Resultados de la primer corrida de exploración

Se utilizó el software Minitab para analizar los datos y se obtuvo la siguiente Tabla ANOVA para cada orificio. Ver tabla 4.7 y 4.8

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efectos principales	3	0.00000166	0.00000166	0.00000055	1.59	0.325
2 interacciones	3	0.00000039	0.00000039	0.00000013	0.37	0.779
3 Interacciones	1	0.00000024	0.00000024	0.00000024	0.70	0.45
Curvatura	1	0.00000093	0.00000093	0.00000093	2.66	0.178
Error residual	4	0.0000014	0.0000014	0.00000035		
Error	4	0.0000014	0.0000014	0.00000035		
Total	12	0.00000463				

**Tabla 4. 7.** Análisis de varianza para el Orificio 1

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efectos principales	3	0.00000052	0.00000052	0.00000017	0.15	0.922
2 interacciones	3	0.00000163	0.00000163	0.00000054	0.48	0.715
3 Interacciones	1	0.00000013	0.00000013	0.00000013	0.11	0.757
Curvatura	1	0.00000056	0.00000056	0.00000056	0.49	0.523
Error residual	4	0.00000454	0.00000454	0.00000114		
Error	4	0.00000454	0.00000454	0.00000114		
Total	12	0.00000737				

**Tabla 4. 8.** Análisis de varianza para el Orificio 2

Como se observa en la Tabla ANOVA de cada orificio no se muestra ningún parámetro significativo ya que  $P \geq 0.05$ , por lo que se realizó un análisis más detallado del proceso para detectar algún otro factor que no se estaba tomando en cuenta. Se analizaron las herramientas que se utilizan y se revisó la máquina internamente y se detectó la utilización de un fixture llamado PIN, el cual es insertado dentro del molde y las piezas para después iniciar el proceso de moldeo por inyección. En la figura 4.11 se muestra una imagen de los PIN utilizados en el proceso.



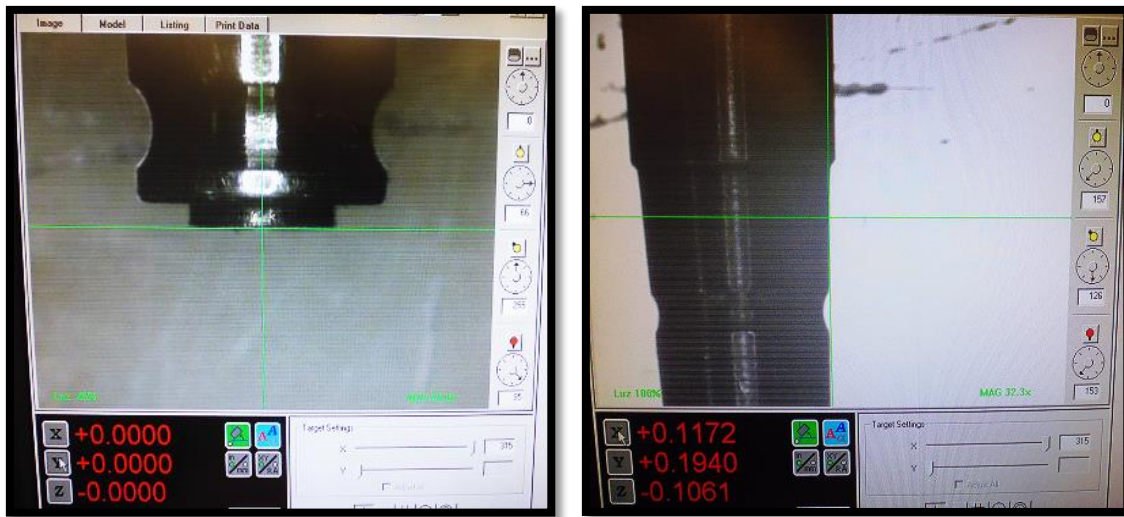
**Figura 4. 11.** Fixture "PIN" utilizado durante el proceso de moldeo de la pieza

Para analizar el fixture “PIN” se midió la altura de los orificios de la pieza 1-1532082-9 con el vernier Mitutoyo absolute. El resultado obtenido nos muestra que la altura del orificio es de 0.1940 mm como lo muestra la figura 4.12



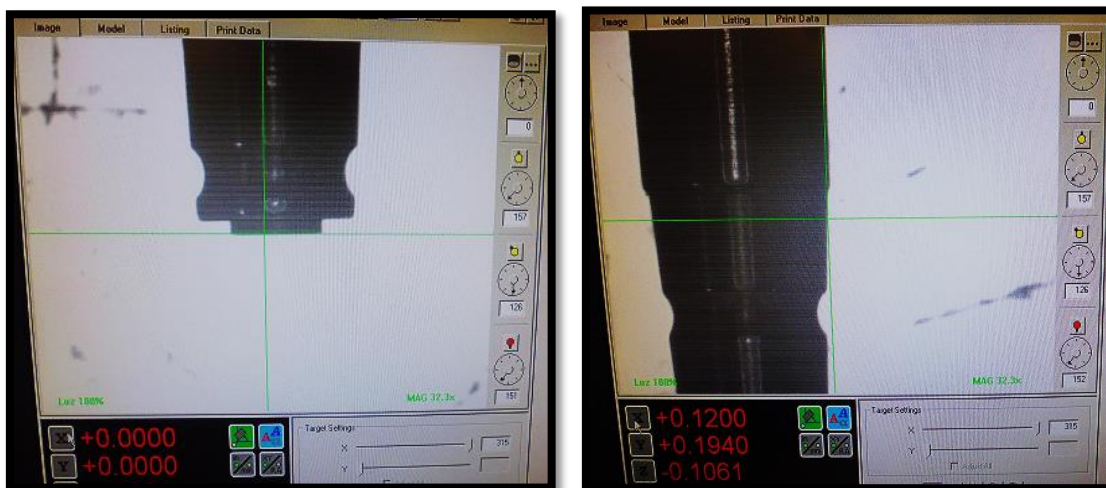
**Figura 4. 12.** Vernier utilizado para la medición de la altura de los orificios de la pieza

A continuación se mide el grosor de los pines que se utilizan para de esta manera analizar si puede ser un factor crítico en las dimensiones del diámetro de los orificios del silicón.



**Figura 4. 13.** Medición del grosor de los PIN en la máquina de medición OGP

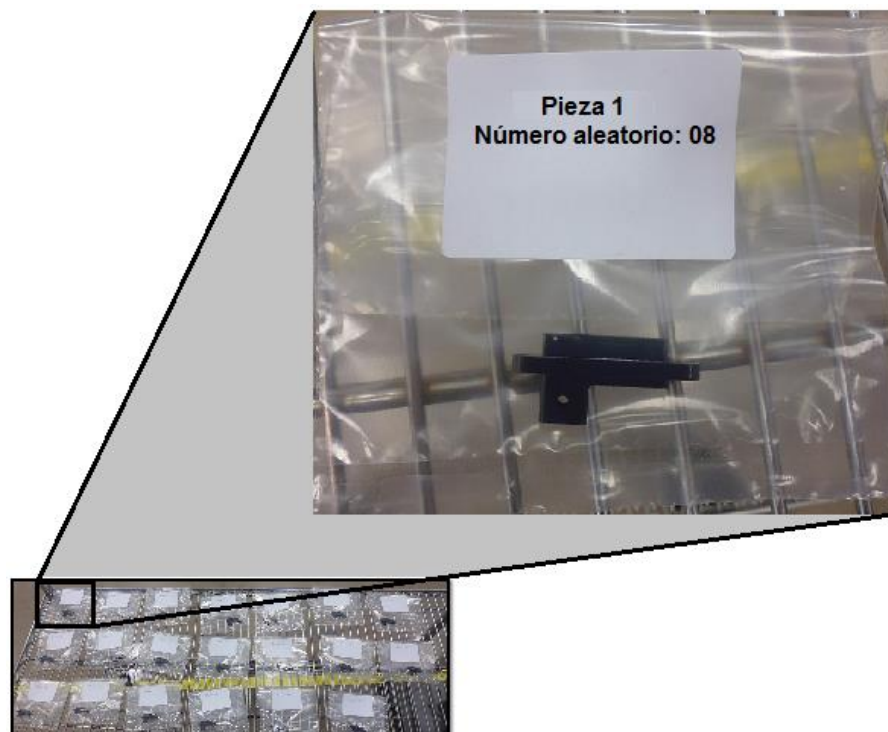
En la figura 4.13 se puede identificar que a una altura de 0.1940 mm se detecta un grosor en el PIN de 0.1172 mm, por lo cual se considera como una causa potencial que puede afectar al proceso productivo en relación a las especificaciones de calidad del orificio 1 y 2. Al considerar los PIN como un factor potencial, se propuso realizar unos pines que a una altura de 0.1940 mm muestre un grosor de 0.120 mm como se muestra en la figura 4.14 y posteriormente realizar un diseño de experimentos para verificar su implementación.



**Figura 4. 14.** Medición del grosor de los PIN propuestos en la máquina de medición OGP

El diseño que se utilizó para determinar si el grosor del PIN es un factor crítico en el diámetro de los orificios fue un experimento con un solo factor donde se hace variar el “PIN” utilizado en el proceso. El procedimiento a seguir para modelar el diseño de experimentos que se utiliza se describe en los siguientes puntos:

1. Se clasificaron los pines en Pin A y Pin B, donde el Pin A es el par que muestra un grosor de 0.1172 mm y e Pin B es el par que muestra un grosor de 0.120 mm.
2. De acuerdo a la disponibilidad del equipo y personal técnico se determinó tomar una muestra de tamaño 10 para cada tipo de Pin.
3. Las muestras fueron enumeradas del 1 al 20, donde las primeras 10 forman parte del Pin A y las muestras del 11 al 20 forman parte del Pin B.
4. Utilizando una hoja de cálculo en Excel, se generaron números aleatorios para cada muestra, determinando de esta manera el orden en el cual se hará el experimento.
5. Se realizó el diseño de experimentos de un solo factor



**Figura 4. 15.** *Diseño de experimentos de un solo factor*

El diseño de experimentos realizado y los datos obtenidos de la medición de las piezas moldeadas se muestran en la tabla 4.9

Pin A (0.117)				Pin B (0.120)			
No.	No Aleatorio	Orificio 1	Orificio 2	No.	No Aleatorio	Orificio 1	Orificio 2
1	(8)	0.1170	0.1180	11	(13)	0.1186	0.1210
2	(11)	0.1190	0.1190	12	(18)	0.1193	0.1218
3	(1)	0.1170	0.1180	13	(12)	0.1210	0.1206
4	(6)	0.1170	0.1189	14	(16)	0.1190	0.1208
5	(7)	0.1177	0.1185	15	(20)	0.1186	0.1202
6	(19)	0.1160	0.1188	16	(5)	0.1202	0.1208
7	(3)	0.1161	0.1191	17	(2)	0.1198	0.1202
8	(15)	0.1174	0.1185	18	(17)	0.1197	0.1204
9	(4)	0.1155	0.1183	19	(9)	0.1191	0.1206
10	(10)	0.1198	0.1190	20	(14)	0.1191	0.1212

**Tabla 4. 9.** Diseño de experimentos con un solo factor (PIN)

De acuerdo a los datos recolectados de cada muestra, se obtiene los resultados mostrados en la tabla 4.10

Orificio 1			Orificio 2		
	Pin A	Pin B		Pin A	Pin B
<b>Media</b>	0.117	0.119	<b>Media</b>	0.119	0.121
<b>StDev</b>	0.001	0.001	<b>StDev</b>	0.000	0.000
<b>Media Mínima</b>	0.116	0.119	<b>Media Mínima</b>	0.118	0.120
<b>Media Máximo</b>	0.118	0.120	<b>Media Máximo</b>	0.119	0.121
<b>Valor Mínimo</b>	0.115	0.118	<b>Valor Mínimo</b>	0.118	0.120
<b>Valor Máximo</b>	0.120	0.121	<b>Valor Máximo</b>	0.120	0.122

**Tabla 4. 10.** Resultados del diseño de experimentos con un solo factor para el Orificio 1 y Orificio 2

## Prueba de diferencia de medias para Orificio 1 y Orificio 2

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

Ho: La media del diámetro del Pin B y Pin A son iguales

H1: La media del diámetro del Pin B es superior al Pin A

	N	Mean	StDev	SE Mean
Pin B	10	0.119440	0.000750	0.00024
Pin A	10	0.11725	0.00133	0.00042

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

**Tabla 4. 11.** Prueba de diferencia de media para Orificio 1

Como se muestra en la tabla 4.11, el valor de la prueba es muy pequeño y cercano a 0, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula, es decir, la media después del cambio de Pin se incrementó.

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

Ho: La media del diámetro del Pin B y Pin A son iguales

H1: La media del diámetro del Pin B es superior al Pin A

	N	Mean	StDev	SE Mean
Pin B	10	0.120760	0.000488	0.00015
Pin A	10	0.118610	0.000412	0.00013

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

**Tabla 4. 12.** Prueba de diferencia de medias para Orificio 2

Como se muestra en la tabla 4.12, el valor de la prueba es muy pequeño y cercano a 0, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula, es decir, la media después del cambio de Pin se incrementó.

## 4.5. Implementación de resultados

Para confirmar que los diámetros del Orificio 1 y 2 cumplen con las especificaciones de calidad, se tomaron los datos de un día de producción utilizando el par de Pin B de 0.120 mm de grosor. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.13

Producción día 4		
Pieza	Orificio 1	Orificio 2
1	0.1200	0.1209
2	0.1195	0.1205
3	0.1188	0.1199
4	0.1196	0.1206
5	0.1196	0.121
6	0.1198	0.1207
7	0.1189	0.1206
8	0.1193	0.1198
9	0.1189	0.1202
10	0.1192	0.1201
11	0.1188	0.1196
12	0.1193	0.1209
13	0.1196	0.1207
14	0.1187	0.1199
15	0.1196	0.1199
16	0.1196	0.1201
17	0.1195	0.1207
18	0.1194	0.1206
19	0.1197	0.1203
20	0.1196	0.1204
21	0.1188	0.1209
22	0.1194	0.1197
23	0.1198	0.120
24	0.1192	0.1203
25	0.1196	0.1197
26	0.1198	0.1205
27	0.1197	0.1205
28	0.1192	0.1205
29	0.1200	0.1206
30	0.1191	0.1204

**Tabla 4. 13.** Datos obtenidos en 1 día de producción con el Pin B



En la tabla 4.14 se muestra el análisis estadístico para cada orificio de los datos obtenidos de un día de producción utilizando el par de Pin B.

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

**Tabla 4. 14.** Análisis estadístico de los datos obtenidos para Orificio 1 y Orificio 2 con Pin B

### Prueba de diferencia de medias para Orificio 1 y Orificio 2

1. Se realiza una prueba de diferencia de medias para el Orificio 1 de los datos obtenidos con Pin B

Ho: La media es igual a 0.120

H1: La media es diferente a 0.120

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	99% CI	T
Orificio 1	30	0.119400	0.000370	0.000068	(0.119214, 0.119586)	-8.87

Variable	P
Orificio 1	0.000

**Tabla 4. 15.** Prueba de diferencia de medias con Pin B para Orificio 1

2. Se realiza una prueba de diferencia de medias para el Orificio 2 de los datos obtenidos con el Pin B

Ho: La media es igual a 0.120

H1: La media es diferente a 0.120

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	99% CI	T	P
Orificio 2	30	0.120350	0.000400	0.000073	(0.120149, 0.120551)	4.80	0.000

**Tabla 4. 16.** Prueba de diferencia de medias con Pin B para Orificio 2

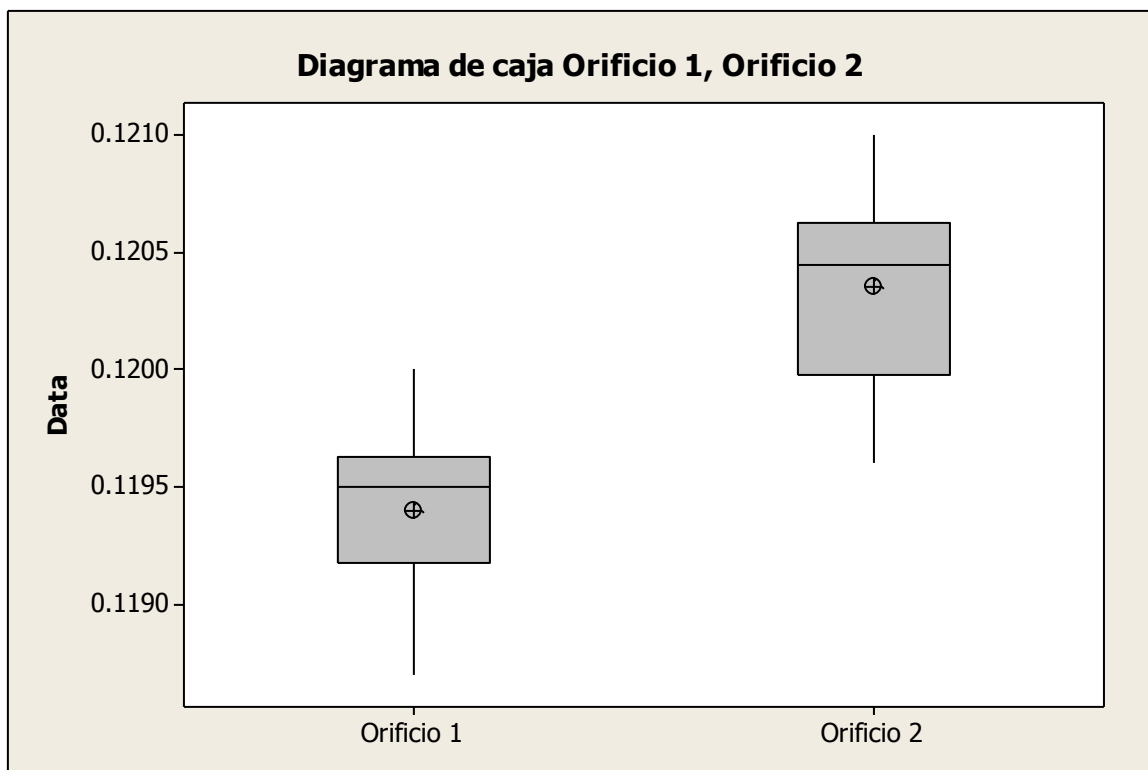
Como se muestra en las tablas 4.15 y 4.16, el valor de la prueba es muy pequeño y cercano a 0, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula en ambos casos, es decir, la

media es diferente de 0.120 mm. En el orificio 1 se muestra que el promedio es menor a 0.120 mm, en cambio en el orificio 2 el promedio es mayor a 0.120 mm. Se observa en la tabla 4.13 el dato mínimo y el dato máximo asociado a cada orificio se encuentran dentro de las especificaciones de calidad requeridas, por lo tanto el proceso se encuentra dentro de especificación.

### Gráficos de producción día 4 Orificio 1 y 2

De acuerdo a los 30 datos recolectados del cuarto día de producción, se elaboró un diagrama de caja para analizar el nuevo proceso, en el cual se tomó como variable crítica la dimensión requerida de acuerdo a especificación del orificio 1 y 2. En el diagrama de caja se visualizan los siguientes puntos:

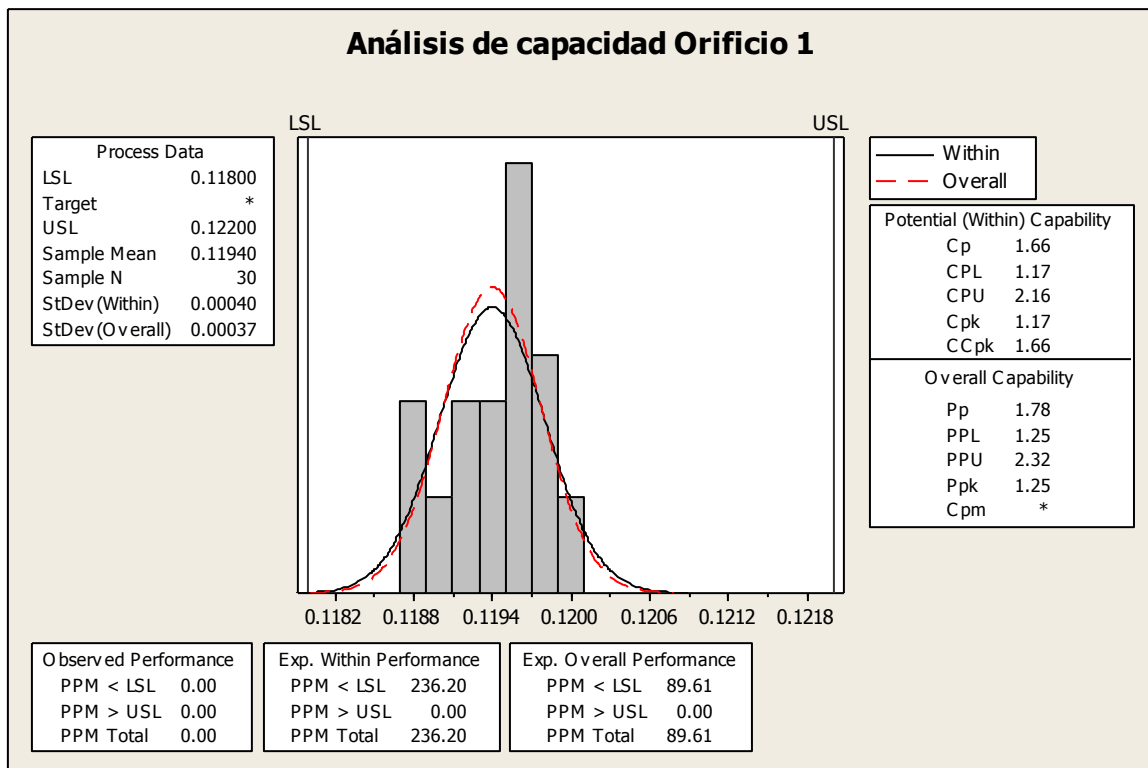
- No hay ningún punto fuera de especificación de 0.118 a 0.122 mm



**Figura 4. 16.** Diagrama de caja Orificio 1 y 2 utilizando el Pin B

De acuerdo a la figura 4.17 de análisis de capacidad de proceso se concluye lo siguiente:

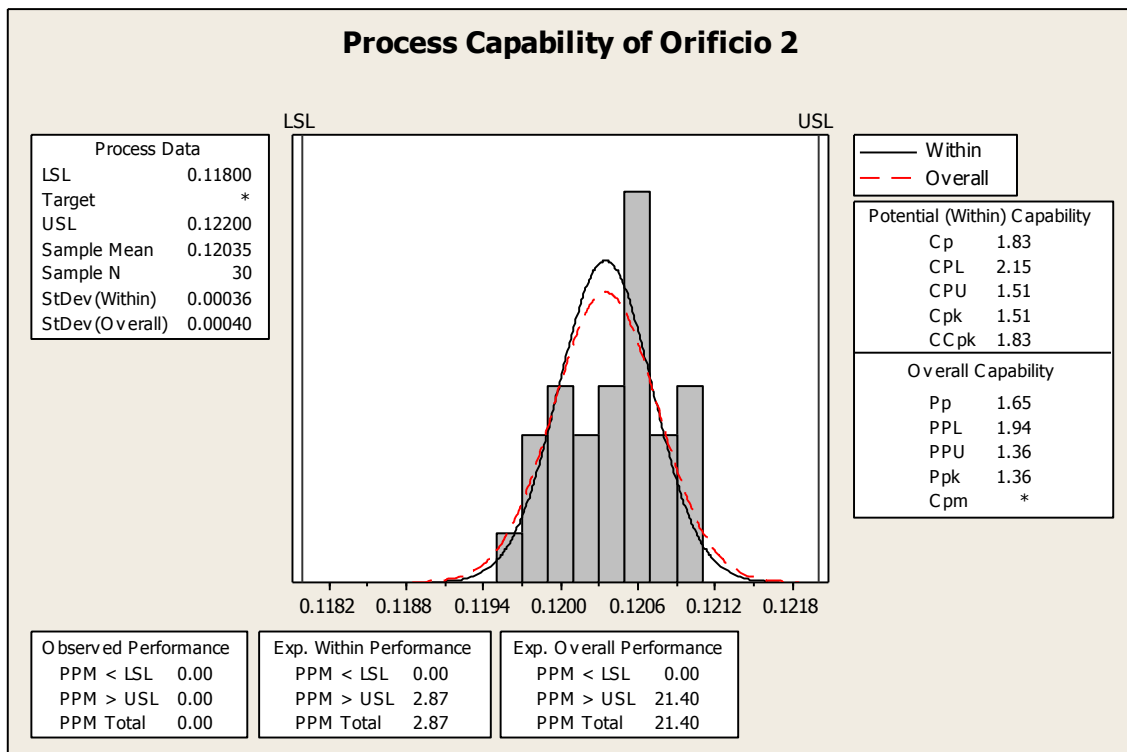
- El comparativo que se realiza de partes por millón (PPM) respecto a las especificaciones del producto nos indica que todas las piezas cumplen con la especificación de calidad, es decir, ningún dato está fuera de la especificación inferior o por arriba de la especificación superior.
- El índice tanto de  $C_p$  como de  $C_{pk}$  mejoró en comparación de los resultados obtenidos anteriormente, es decir, la capacidad potencial incrementó de un  $C_p = 0.88$  y  $C_{pk} = -0.15$  a  $C_p = 1.66$  y  $C_{pk} = 1.17$
- Una vez mejorado el diseño del PIN utilizado, las partes por millón totales de no conformidad disminuyeron, por lo que de las 611,111 piezas defectuosas que se tenían anteriormente, ahora se muestra que 0 piezas están fuera de especificación.



**Figura 4. 17.** Análisis de capacidad del Orificio 1 utilizando el Pin B

Así mismo, se elaboró un análisis de capacidad de proceso para el Orificio 2, donde se concluye lo siguiente:

- El comparativo que se realiza de partes por millón (PPM) respecto a las especificaciones del producto nos indica todas las piezas cumplen con la especificación de calidad, es decir, ningún dato está fuera de la especificación inferior o por arriba de la especificación superior.
- El índice tanto de  $C_p$  como de  $C_{pk}$  mejoró en comparación de los resultados obtenidos anteriormente, es decir, la capacidad potencial incrementó de un  $C_p = 0.99$  y  $C_{pk} = 0.05$  a  $C_p = 1.83$  y  $C_{pk} = 1.51$
- Una vez mejorado el diseño del PIN utilizado, las partes por millón totales de no conformidad disminuyeron, por lo que de las 300,000 piezas defectuosas que se tenían anteriormente, ahora se muestra que 0 piezas están fuera de especificación.



**Figura 4. 18.** Análisis de capacidad del Orificio 2 utilizando el Pin B

Una vez mejorado el primer problema relacionado con la especificación del diámetro de los orificios de la pieza, podemos enfocarnos a optimizar el proceso de moldeo por inyección determinando los valores óptimos de cada parámetro.

Se realizó un diseño de experimentos con bloques, tomando la temperatura como la variable de bloqueo.

El diseño consistió en dos bloques: temperatura baja (450° F) y temperatura alta (480° F), tomando en cuenta las 4 variables indicadas en la tabla 4.17.

#### 1. Bloque temperatura baja (450° F)

OrdenEst	Orden Corrida	PtCentral	A	B	C	D	Velocidad inyección	Tiempo de inyección	Tiempo de enfriamiento	Presión
11	1	1	-1	1	-1	1	1.5	3	2	1.8
5	2	1	-1	-1	1	-1	1.5	1	4	1.0
12	4	1	1	1	-1	1	2.5	3	2	1.8
16	7	1	1	1	1	1	2.5	3	4	1.8
9	8	1	-1	-1	-1	1	1.5	1	2	1.8
10	11	1	1	-1	-1	1	2.5	1	2	1.8
6	14	1	1	-1	1	-1	2.5	1	4	1.0
13	22	1	-1	-1	1	1	1.5	1	4	1.8
3	24	1	-1	1	-1	-1	1.5	3	2	1.0
8	27	1	1	1	1	-1	2.5	3	4	1.0
2	28	1	1	-1	-1	-1	2.5	1	2	1.0
7	32	1	-1	1	1	-1	1.5	3	4	1.0
15	34	1	-1	1	1	1	1.5	3	4	1.8
1	35	1	-1	-1	-1	-1	1.5	1	2	1.0
4	36	1	1	1	-1	-1	2.5	3	2	1.0
14	37	1	1	-1	1	1	2.5	1	4	1.8

**Tabla 4. 17.** Diseño experimental para Bloque 1

## 2. Bloque temperatura alta (480° F)

OrdenEst	Orden Corrida	PtCentral	A	B	C	D	Velocidad inyección	Tiempo de inyección	Tiempo de enfriamiento	Presión
23	3	1	-1	1	1	-1	1.5	3	4	1.0
28	5	1	1	1	-1	1	2.5	3	2	1.8
18	6	1	1	-1	-1	-1	2.5	1	2	1.8
19	9	1	-1	1	-1	-1	1.5	3	2	1.0
22	10	1	1	-1	1	-1	2.5	1	4	1.0
30	12	1	1	-1	1	1	2.5	1	4	1.8
21	13	1	-1	-1	1	-1	1.5	1	4	1.0
27	16	1	-1	1	-1	1	1.5	3	2	1.8
24	17	1	1	1	1	-1	2.5	3	2	1.0
17	21	1	-1	-1	-1	-1	1.5	1	2	1.0
26	23	1	1	-1	-1	1	2.5	1	2	1.8
32	25	1	1	1	1	1	2.5	3	4	1.8
29	26	1	-1	-1	1	1	1.5	1	4	1.8
20	29	1	1	1	-1	-1	2.5	3	2	1.0
25	31	1	-1	-1	-1	1	1.5	1	2	1.8
31	33	1	-1	1	1	1	1.5	3	4	1.8

Tabla 4. 18. Diseño experimental para Bloque 2

En la tabla 4.19 y 4.20 se muestran los resultados obtenidos en el diseño de experimentos:

## 1. Bloque temperatura baja (450° F)

A	B	C	D	Peso antes del silicón inyectado (Peso 1)	Peso después del silicón inyectado (Peso 2)	Diferencia	Defecto
-1	1	-1	1	2.76	2.81	0.05	Incompleta
-1	-1	1	-1	2.77	2.80	0.03	Incompleta
1	1	-1	1	2.76	2.83	0.07	Incompleta
1	1	1	1	2.74	2.83	0.09	Incompleta
-1	-1	-1	1	2.72	2.83	0.06	Incompleta
1	-1	-1	1	2.73	2.89	0.16	Exceso de Silicón
1	-1	1	-1	2.73	2.83	0.10	OK
-1	-1	1	1	2.73	2.74	0.01	Incompleta
-1	1	-1	-1	2.73	2.77	0.04	Incompleta
1	1	1	-1	2.73	2.85	0.12	Exceso de Silicón
1	-1	-1	-1	2.72	2.82	0.10	Exceso de Silicón

-1	1	1	-1	2.70	2.83	0.13	Exceso de Silicón
-1	1	1	1	2.69	2.79	0.10	OK
-1	-1	-1	-1	2.70	2.82	0.12	Exceso de Silicón
1	1	-1	-1	2.72	2.80	0.08	Incompleta
1	-1	1	1	2.73	2.84	0.11	Exceso de Silicón

**Tabla 4. 19.** Resultados diseño experimental bloque 1

## 2. Bloque temperatura alta (480° F)

A	B	C	D	Peso antes del silicón inyectado (Peso 1)	Peso después del silicón inyectado (Peso 2)	Diferencia	Defecto
-1	1	1	-1	2.76	2.80	0.04	Incompleta
1	1	-1	1	2.73	2.81	0.08	Incompleta
1	-1	-1	-1	2.73	2.80	0.07	Incompleta
-1	1	-1	-1	2.74	2.85	0.11	Exceso de Silicón
1	-1	1	-1	2.74	2.86	0.12	Exceso de Silicón
1	-1	1	1	2.73	2.86	0.13	Exceso de Silicón
-1	-1	1	-1	2.74	2.77	0.03	Incompleta
-1	1	-1	1	2.72	2.85	0.13	Exceso de Silicón
1	1	1	-1	2.73	2.75	0.02	Incompleta
-1	-1	-1	-1	2.71	2.72	0.01	Incompleta
1	-1	-1	1	2.73	2.75	0.02	Incompleta
1	1	1	1	2.72	2.84	0.12	Exceso de Silicón
-1	-1	1	1	2.73	2.83	0.10	Exceso de Silicón
1	1	-1	-1	2.72	2.84	0.12	Exceso de Silicón
-1	-1	-1	1	2.72	2.85	0.13	Exceso de Silicón
-1	1	1	1	2.72	2.82	0.10	OK

**Tabla 4. 20.** Resultados diseño experimental bloque 2

## Análisis de varianza de diseño de bloques

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	0.0015125	0.0026727	0.0026727	3.27	0.091
Main Effects	4	0.0426746	0.0407881	0.0101970	12.48	0.000
2-Way Interactions	6	0.0029323	0.0031304	0.0005217	0.64	0.698
3-Way Interactions	4	0.0017381	0.0017754	0.0004438	0.54	0.707
4-Way Interactions	1	0.0002319	0.0002319	0.0002319	0.28	0.602
Residual Error	15	0.0122606	0.0122606	0.0008174		
Lack of Fit	13	0.0120606	0.0120606	0.0009277	9.28	0.101
Pure Error	2	0.0002000	0.0002000	0.0001000		
Total	31	0.0613500				

**Tabla 4. 21.** Análisis de varianza de diseño de bloques

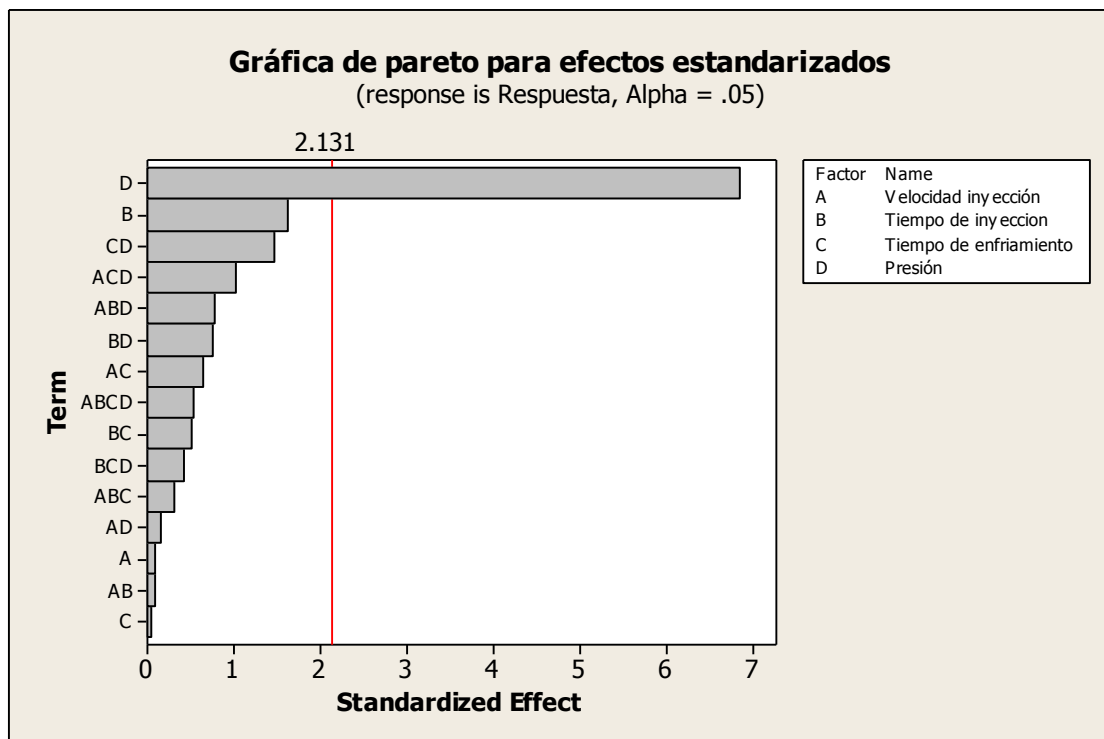
Como se muestra en la tabla 4.21 de Análisis de Varianza, solo los efectos principales afectan en el proceso de moldeo por inyección, basados en el valor de la prueba.

En la siguiente tabla de efectos estimados y coeficientes de respuesta, se muestran los efectos principales y su valor de prueba, para de esta manera analizar cuáles de ellos tiene mayor efecto en la respuesta.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.076080	0.005279	14.41	0.000
Block		0.009545	0.005279	1.81	0.091
Velocidad inyección	0.000909	0.000455	0.005279	0.09	0.933
Tiempo de inyeccion	0.017083	0.008542	0.005260	1.62	0.125
Tiempo de enfriamiento	0.000455	0.000227	0.005265	0.04	0.966
Presión	0.072803	0.036402	0.005302	6.87	0.000

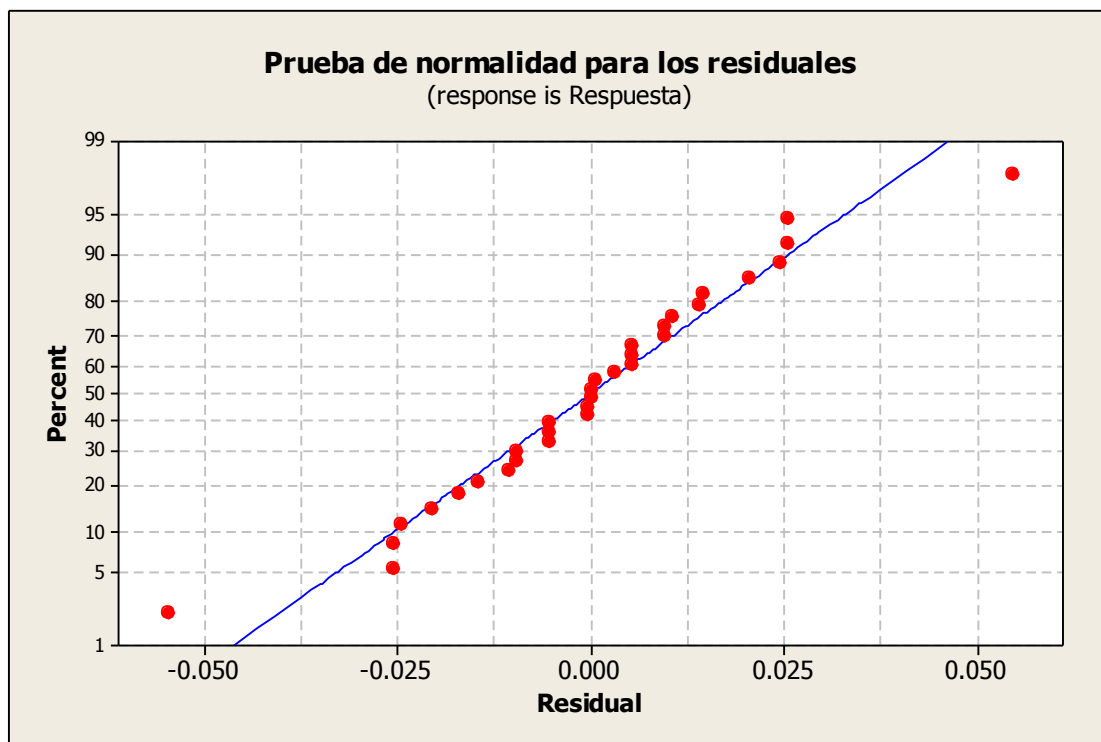
**Tabla 4. 22.** Efectos estimados y coeficientes de respuesta

Según la tabla 4.22, la variable con mayor efecto en el proceso es la presión, seguida de un efecto leve del tiempo de inyección. Basado en los resultados del experimento se utiliza una gráfica de Pareto para ilustrar los resultados del experimento.



**Figura 4. 19.** Gráfica de Pareto para efectos estandarizados





**Figura 4. 20.** Prueba de normalidad para los residuales

Para verificar que cualquier modificación que se le realizará a las variables: velocidad de inyección (A), tiempo de inyección (B) y tiempo de enfriamiento (C) su efecto sería mínimo en el resultado de la variable de respuesta, se ejecutó un experimento adicional en el que todas ellas se centraron, además de la presión.

Diseño de experimental basado en puntos centrales

OrdenEst	Orden Corrida	PtCentral	A	B	C	D	Velocidad inyección	Tiempo de inyección	Tiempo de enfriamiento	Presión
36	15	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
34	18	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
33	19	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
37	20	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
35	30	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
38	38	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
39	39	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
40	40	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
41	41	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
42	42	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4

43	43	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
44	44	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
45	45	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
46	46	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
47	47	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4
48	48	0	0	0	0	0	2	2	3	1.4

**Tabla 4. 23.** *Diseño experimental basado en puntos centrales*

Se obtuvieron los siguientes resultados

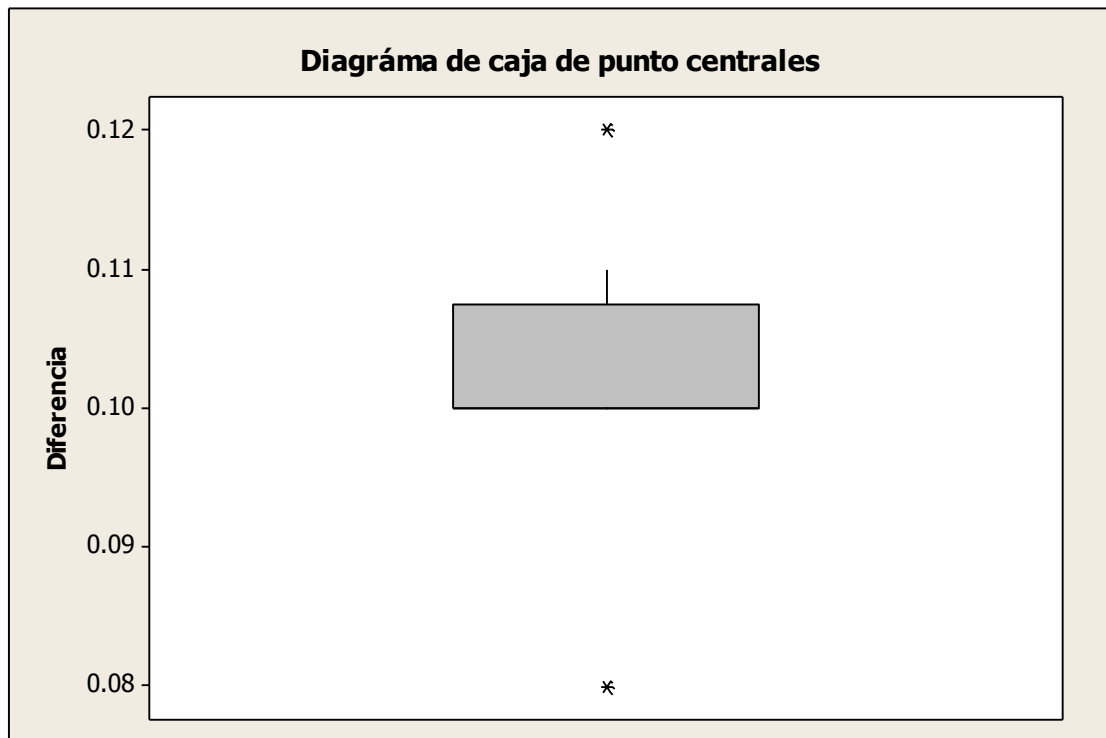
A	B	C	D	Peso antes del silicón inyectado (Peso 1)	Peso después del silicón inyectado (Peso 2)	Diferencia	Defecto
0	0	0	0	2.73	2.83	0.10	OK
0	0	0	0	2.74	2.84	0.10	OK
0	0	0	0	2.73	2.74	0.01	Incompleta
0	0	0	0	2.74	2.76	0.02	Incompleta
0	0	0	0	2.73	2.83	0.10	OK
0	0	0	0	2.73	2.84	0.11	Exceso de Silicón
0	0	0	0	2.73	2.83	0.10	OK
0	0	0	0	2.73	2.84	0.11	OK
0	0	0	0	2.72	2.82	0.10	OK
0	0	0	0	2.72	2.82	0.10	OK
0	0	0	0	2.73	2.83	0.10	OK
0	0	0	0	2.73	2.83	0.10	OK
0	0	0	0	2.75	2.85	0.10	OK
0	0	0	0	2.74	2.84	0.10	OK
0	0	0	0	2.73	2.83	0.10	OK
0	0	0	0	2.73	2.83	0.10	OK

**Tabla 4.23** *Resultados diseño experimental en puntos centrales*

En base a los resultados obtenidos en los experimentos, se puede deducir que para obtener una pieza de calidad que cumpla con las especificaciones anteriormente mencionadas, se debe de inyectar 0.10 gr de silicón aproximadamente en la pieza.

El resultado se analizó junto con el Ingeniero de Moldeo y el equipo de producción y se acordó en tomar como medida estándar el peso de 0.10 gr de silicón inyectado para obtener piezas de calidad.

En base a los resultados obtenidos en el diseño se realiza un diagrama de caja para la diferencia de pesos en las piezas.



**Figura 4. 21.** Diagrama de caja de puntos centrales

La media, la desviación estándar así como el intervalo de confianza del 99% son: 0.10188, 0.00834 y (0.0957, 0.1080) respectivamente.

Se diseñó un experimento adicional para confirmar que la cantidad de silicón inyectada necesaria para obtener piezas de calidad es de 0.10 gr en promedio, basado en los resultados de los experimentos anteriores.

Presión 1			
Pieza	Núm. Aleatorio	Peso antes	Peso después
1	(4)	2.75	2.81
2	(15)	2.75	2.81
3	(6)	2.75	2.81
4	(12)	2.73	2.78
5	(13)	2.71	2.77
Presión 1.4			
Pieza	Núm. Aleatorio	Peso antes	Peso después
6	(8)	2.73	2.83
7	(5)	2.76	2.86
8	(9)	2.76	2.86
9	(1)	2.79	2.89
10	(7)	2.76	2.86
Presión 1.8			
Pieza	Núm. Aleatorio	Peso antes	Peso después
11	(11)	2.76	2.87
12	(10)	2.75	2.87
13	(3)	2.77	2.89
14	(14)	2.72	2.84
15	(2)	2.76	2.87

**Tabla 4. 24.** Experimento de confirmación

Los resultados se concentran en la tabla 4.25

Presión (bar)		
1	1.4	1.8
0.06	0.10	0.11
0.06	0.10	0.12
0.06	0.10	0.12
0.05	0.10	0.12
0.06	0.10	0.11

**Tabla 4. 25.** Resultados experimento de confirmación

El Análisis de Varianza indica que los distintos valores de la presión usados afectan en la variable de respuesta, es decir, en el llenado de las piezas de silicón.

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	0.0080400	0.0040200	134.00	0.000
Error	12	0.0003600	0.0000300		
Total	14	0.0084000			

S = 0.005477    R-Sq = 95.71%    R-Sq(adj) = 95.00%

**Tabla 4. 26.** Análisis de varianza para los distintos valores de presión

Se realiza una prueba de Tukey para comparaciones múltiples de medias. Se observa que la presión en el nivel de 1.4 bar, es el adecuado para obtener piezas de calidad que cumplan con el requerimiento deseado.

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
1	5	0.05800	0.00447	(--*--)
1.4	5	0.10000	0.00000	(--*--)
1.8	5	0.11200	0.00837	(--*--)

-----+-----+-----+-----+-----+-----  
 0.60      0.080      0.100      0.120

**Tabla 4. 27.** Prueba Turkey para comparaciones de medias

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

Después de realizar el primer diseño de experimentos en el proceso de moldeo se concluyó que el factor principal que interviene en la variación de la medida de los orificios es un par de fixture llamados "Pin", que se utilizan durante el proceso de moldeo. Al determinar que el Pin era un factor crítico que afecta en la variable de respuesta, se realizó una modificación en el diseño, es decir, a una altura de 0.194 mm se determinó un grosor de 0.120 mm. Se realizó un segundo diseño de experimentos de un solo factor, es decir, solo se hizo variar el fixture Pin utilizado en el proceso, el cual se dividió en Pin A (.117 mm) y Pin B (.120 mm). Finalmente los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente.

Se puede resaltar que en el estado inicial del proceso las partes por millón totales de no conformidad eran de 611,111 piezas para el orificio 1 y 300,000 piezas para el orificio 2, las cuales se localizaban por debajo de la especificación inferior. Después de rediseñar el fixture, las partes por millón totales de no conformidad disminuyeron en su totalidad a 0 piezas fuera de especificación para el Orificio 1 y 2. Además, el índice tanto de  $C_p$  como de  $C_{pk}$  mejoró en comparación de los resultados obtenidos anteriormente para cada orificio, es decir, la capacidad potencial incrementó de un  $C_p = 0.91$  y  $C_{pk} = -0.10$  a  $C_p = 1.66$  y  $C_{pk} = 1.17$  para el Orificio 1 y de un  $C_p = 0.1$  y  $C_{pk} = 0.08$  a  $C_p = 1.83$  y  $C_{pk} = 1.51$  para el Orificio 2.

Una vez que el primer problema se resolvió, se enfocó a determinar los valores óptimos de los parámetros de la máquina para de ésta manera obtener una pieza de calidad.

Después de realizar varios diseños de experimentos, se determinó que para que la pieza cumpla con los requerimientos del cliente se tiene que inyectar 0.10 gr de silicón. Esta medida quedó documentada en el proceso como una medida estandar, la cual servirá como punto de comparación para la producción futura.

Los resultados de los diseños de experimentos muestran que el factor principal que influye sobre la variable de respuesta es la presión, la cual tiene que estar en un valor

de 1.4 bar. Estando la presión en este valor se evita producir piezas incompletas o con exceso de silicón, por lo cual, se reduce el desperdicio del mismo y se eliminan los retrabajos en las piezas moldeadas.

Una vez determinando el valor del factor principal, se define el valor de los parámetros variables de la máquina de la siguiente manera:

Parámetro	Valor
1. Temperatura del molde	345°F
2. Velocidad de inyección	1.5 in/seg
3. Tiempo de inyección	1 min
4. Tiempo de enfriamiento	1 min

*Tabla 5. 1. Valores óptimos de los parámetros variables de la máquina BOY*

Se decide mantener el valor mínimo en la temperatura y en la velocidad de inyección para lograr importantes reducciones en el consumo de energía sin que ello afecte a la productividad o a la calidad del producto. Además existirá una reducción de costos de calidad para la empresa y resultará beneficioso para la salud del medio ambiente. Así mismo se propone establecer el tiempo de inyección y el tiempo de enfriamiento en la especificación mínima, para de esta manera obtener el tiempo de ciclo más corto y poder aumentar la producción de las piezas.

Una vez que ya se identificaron y controlaron los factores que influyen en el proceso productivo, se puede afirmar que los defectos en las piezas moldeadas se han reducido lo que confirma la hipótesis planteada al inicio del proyecto.

Al mejorar el proceso se obtiene un impacto positivo en la satisfacción del cliente, cumpliendo sus expectativas de manera mas efectiva y eficiente, al embarcar un producto que cumpla con las características de calidad requeridas por el cliente. Se eliminan los tiempos de retrabajo, y se minimizan los costos por factor de desperdicio.

El diseño de experimentos es una herramienta muy útil para obtener un conocimiento más profundo acerca de la respuesta y se usan generalmente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de ellos sobre

una respuesta. En éste estudio, dicho método se ha utilizado para investigar la variación que existe en el diámetro de los orificios de piezas moldeadas por moldeo por inyección con respecto al requerimiento de calidad exigido por el cliente.

El diseño de experimentos es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores. Con esta técnica se puede conseguir entre otras, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir su variabilidad o los costos de producción. Todos los tipos de industrias se pueden beneficiar de la aplicación del diseño de experimentos, incluso en aquellas de servicio.

### Recomendaciones

1. Se recomienda realizar un estudio de los fixture PIN para determinar el ciclo de vida de la herramienta, con el objetivo de evitar un deterioro en la pieza que ocasione un descontrol en el proceso. Además, una vez propuestos los valores óptimos de los parámetros de la máquina se puede realizar un estudio de los beneficios que se obtuvieron tanto para la operadora como para el proceso y la empresa.
2. Realizar un estudio económico donde se analice la reducción de costos al disminuir el desperdicio de silicón, la mano de obra invertido en retrabajos.
3. Analizar la eficiencia del proceso productivo, es decir, el aumento de piezas producidas al día, porcentaje de reducción de piezas defectuosas, entre otros métricos.
4. Durante el desarrollo del proyecto se observaron oportunidades de mejora que se pueden hacer a la estación de trabajo y que permitan a las operadoras trabajar de una manera más segura y cómoda. Algunos ejemplos serían:
  - Ajustar la mesa y silla para que estén a la altura de la máquina y la operadora no se esté levantando cada vez que se termina el ciclo de moldeo en la pieza.
  - Diseñar un fixture para expulsar la pieza de la máquina de una manera más sencilla, ya que el método actual es bastante complicado.



- Estudio de la utilización de equipo de protección personal adecuado para utilizar máquinas que usualmente están a grandes temperaturas.

Por lo cual se recomienda hacer un estudio ergonómico para realizar un buen diseño del sistema de trabajo de modo que sea eficiente, seguro y saludable para las personas que forman parte de él.

## Referencias

- Amaya Contreras, I., Araque Herrera, A., & Correa Cely, R. (2011). Uso de algoritmos metaheurísticos híbridos para la minimización de entropía en problemas de transferencia de calor en circuitos electrónicos. *Ingeniería y Universidad*, 403-421.
- Antony, J., & Antony, J. (2001). Teaching the Taguchi method to industrial engineers. *Work Study*, 141-149.
- Bharti, P., Khan, M., & Singh, H. (2012). Recent methods for optimization of plastic injection molding process - A retrospective and literature review. *Optimization or Macnining Techniques*, 26-36.
- Butler, A., Rothery, P., & Roy, D. (2003). Minitab Macros for Resampling Methods. *Teaching Statistics*, 22-25.
- Camisión, C., & Pérez, D. (2010). The future of the quality/excellence fuction: A vision from the Spanish firm. *Routledge*, 649-672.
- Castillo, A. (2007). Optimización de las variables de presión y temperatura en el proceso de moldeo por inyección de polipropileno en la fabricación de tapas para mejorar los índices de calidad. *Tesis de maestría*.
- Chailly, M., Charneau, J., Bereaux, Y., & Monasse, B. (2007). Influence of Mold Surface Treatments on Flow of Polymer in Injection Moulding. Application to Weldlines. *American Institute of Physics*, 915-920.
- Chih-Cherng, C., Pao-Lin, S., & Yan-Cherng, L. (2009). Analysis and modeling of effective parameters for dimension shrinkage variation of injection molded part with thin shell feature using response surface methodology. *Int J Adv Manuf Technol*, 1087–1095.
- Curic, D., Veljkovic, Z., & Duhovnik, J. (2012). Comparison of methodologies for identificación of process parameters affecting geometric deviations in plastic injection molding of housing using Taguchi method. *Mechanika*, 671-676.
- García Villalpando, J., Castillo Morales, A., Ramírez Guzmán, M., Rendón Sánchez, G., & Larqué Saavedra, M. (2001). A COMPARISON OF TUKEY, DUNCAN, DUNNETT, HSU AND BECHHOFER. *Agrociencia* 35, 79-86.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. México: Prentice Hall.
- Hussin, R., Mohd Saad, R., Hafiezal, M., Fairuz, M., & Hussin, R. (2013). Optimization of the Plastic Injection Molding Parameters for Sport Equipment by Using Design of Experiment. *International Review of Mechanical Engineering*, 453-462.

- Jeang, A. (1999). Robust Tolerance Desing by Response Surface Methodology. *Advance Manufacturing Technology*, 399-403.
- Kairong, L. (2010). Aspects of Quality Tools on Total Quality Management. *Modern Applied Science*, 66-74.
- Ko-Ta, C., & Fu-Ping, C. (2006). Analysis of shrinkage and warpage in an injection-molded part with a thin shell feature using the response surface methodology. *Int J Adv Manuf Technol*, 468-479.
- Kurt, K., Kaynak, A., & Girit, O. (2009). Experimental investigation of plastic injection molding: assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Master Des*, 3217-3224.
- Mast, J., Werner, A., Ronald, J., & Edwin, R. (2000). Steps and Strategies in Process Improvement. *Quality and Reliability Engineering International*, 301-311.
- Mathivanan, D., & Parthasarathy, N. (2009). Sink-mark minimization in injection molding through response surface regression modeling and genetic algorithm. *Int J Adv Manuf Technol*, 867-874.
- Ming-Tsan, C., Yung-Kuang, Y., & Yun-Hsiang, H. (2009). Modeling and Optimization of Injection Molding Process Parameters for Thin-Shell Plastic Parts. *Polymer-Plastics Technology & Engineering*, 745-753.
- Miranda Caballero, A., Shkiliova, L., Iglesias Coronel, C., & Anillo, J. (2003). Dertermination of the quantity of technical maintenances of the New Holland L 520 machines croppers rice. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 59-62.
- mks. (2012). The Optimization of Injection Molding Processes Using Design of Experiments. *Technology for Productivity*, 1-8.
- Montgomery, D. (2004). *Introduction to Statistical Quality Control*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.
- Montgomery, D. (2005). *Diseño y Análisis de experimentos*. Limusa S.A de C.V.
- Mosquera-Artamonov, J., Artamonova, I., & Mosquera, J. (2014). Diagnóstico del proceso de inspección mediante índices de capacidad. *Ingeniare*, 53-61.
- Mustafa, K., Yusuf, K., Kamber, O., Mutlu, B., Bakir, B., & Koklu, U. (2009). Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts. *Int J Adv Manuf Technol*, 571-578.

- Oktem , H., Erzumlu, T., & Kurtaran, H. (2005). Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *J Mater Process Technol*, 11-16.
- Rosato, D., Rosato, D., & Rosato, M. (2000). *Injection Molding Handbook*. Kluwer Academic Publishers.
- Sánchez, V. (2002). *Modleo por inyección de termoplásticos*. México: Limusa.
- Saurav, D., Bandyopadhyay, A., & Kumar, P. (2008). Greybased Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead-on iplate. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 1136-114.
- Shayfull, Z., Fathullah, M., Sharif, S., Nasir, S., & Shuaib, N. (2011). Warpge Analysis on Ultra-Thin Shell by Using Taguchi Method and Analysis of Variance (ANOVA) for Three-Plate Mold . *International Review of Mechanical Engineering*, 1116-1124.
- Shuaib, N., Nasir, S., Fathullah, M., Shayfull, Z., & Abdul Manan, M. (2012). The Influence of Different Mold Temperature on Warpge in a Thin Shallow Injection Molding Process. *International Review of Mechanical Engineering*, 11-16.
- Shuaib, N., Nasir, S., Fathullah, M., Shayfull, Z., & Bahari, M. (2012). Optimization on Parameter Settings in Determining Warpge Factors of a Side-Gated Thin Shallow Part Injection Molding for PP, ABS & PC+ABS Materials. *International Review of Mechanical Engineering*, 865-870.
- Stanek, M., Manas, M., Manas, D., Kyas, K., Navratil, J., & Senkerik, V. (2011). Injection molding process and its optimization. *International DAAAM*, 155-156.
- Tanco, M., Viles, E., & Pozueta, L. (2009). Diferentes Enfoques del Diseño de Experimentos (DOE). *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, 29-37.
- Valdiviezo Márquez, M., & Simón Fermín, J. (2010). Estimación de índices de capacidad de procesos usando la distribución generalizada de Pareto. *Ingeniería Industrial*, 93-106.
- Zargi, U., Kusar, J., Barlec, T., & Starbek, M. (2009). A company's readiness for concurrent product and process development. *Journal of Mechanical Engineering*, 427-437.
- Zhao, P., Zhou, H., Li, Y., & Li, D. (2010). Process parameters optimization of injection molding using faste strip analysis as a surrogate model. *Manuf Technol*, 949-959.

# Anexos

Piezas Incompletas	Piezas con exceso de silicón	Silicón en el contacto
		
		
		

*Tabla 7. 1. Imágenes de piezas defectuosas producidas durante el proceso de moldeo por inyección de la pieza 1-1532082-9*