



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad

**APLICACIÓN DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA MEJORA DEL PROCESO DE
MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO DE LA PIEZA "FIN INSTRUMENT" EN INDUSTRIAS
CAMCA S.A. DE C.V.**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA DE CALIDAD

Presenta:

Julio César Lesso García

Dirigido por:

M.C. Guillermo Hiyane Nashiro

SINODALES

M.C. Guillermo Hiyane Nashiro
Presidente

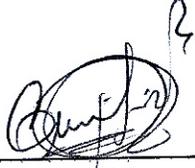
Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Secretario

Dr. Miguel Galván Ruiz
Vocal

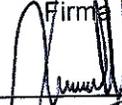
M.C. Luis Lúcia Mendoza
Suplente

M.I. Raúl Arroyo Martínez Fabre
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre 2012
México

RESUMEN

Este proyecto expone un estudio realizado sobre un proceso de moldeo por inyección de plástico en una empresa del sector automotriz y de electrodomésticos; donde fue implementado el enfoque del diseño experimental al proceso de inyección de la pieza llamada “Fin Instrument”, con el fin de reducir los rechazos más frecuentes generados en la fabricación de esta pieza. Para este proceso se aplicó inicialmente un Diseño Factorial Fraccionado (DFF) con 9 factores y 16 corridas (2^{9-5}), a fin de determinar los factores significativos. Como resultado se detectaron 4 factores: “Tiempo de inyección”, “Temperatura de masa”, “Presión de inyección” y “Presión de Sostenimiento”. Posteriormente, para la optimización de los factores significativos se aplicó un Diseño Central Compuesto (DCC) donde se encontraron los valores óptimos de los niveles de cada factor. Al final se realizó una corrida de confirmación de cuatro días de producción en la que los rechazos por este defecto (piezas incompletas) fueron de “0” piezas.

(Palabras clave: Moldeo, Experimentos, Diseño, Optimización, Proceso, Inyección, Plástico, Factores).

ABSTRACT

This project presents a study of a plastic injection molding process in an automotive and electrical appliances company; where the approach of Experimental Design to injection process of the piece called “Fin Instrument” was implemented in order to reduce the frequent waste generated in the production of this piece. For such process, a Fractional Factorial Design (FFD) with 9 factors and 16 runs (2^{9-5}) was initially applied to determine the significant factors. As a result, 4 factors were detected: “Injection time”, “Mass temperature”, “Injection pressure2” and “Holding pressure”. Subsequently, to optimize the significant factors, a Composite Central Design (CCD) was applied where the optimal values of the levels of each factor were found. At the end, a confirmation run of four days of production was executed, in which the waste by this defect (incomplete pieces) were of “0” pieces.

(Key words: Molding, Experiments, Design, Optimization, Process, Injection, Plastic, Factors.)

DEDICATORIAS

A dios.

Por darme vida, salud y la oportunidad de culminar este proyecto.

A mi familia.

Mis padres; Ofelia y Jaime, mis hermanos; José Jaime y Alexis Giovanni; quienes me han apoyado en cada decisión que he tomado en el transcurso de mi vida, por siempre estar a mi lado cuando más los necesito. A ellos por inculcarme los buenos valores de la vida y guiarme por el buen camino. Por compartir sus experiencias conmigo y mostrarme su alegría en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor M.C. Guillermo Hiyane Nashiro por guiarme en el desarrollo de esta tesis y compartir conmigo sus conocimientos, así como sus experiencias profesionales.

A los Ingenieros; Hugo Manuel Torres Vázquez y Arturo Campos López, por apoyarme durante el desarrollo de este proyecto y haberme permitido implementarlo en la empresa Industrias Camca S.A. de C.V.

A todos los Profesores del Posgrado de Ingeniería de Calidad, a mis amigos (as), compañeros (as) y todas aquellas personas que desinteresadamente me apoyaron para culminar esta Tesis.

INDICE

Cuadro	Página
Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice.....	v
Índice de Tablas.....	vii
Índice de Graficas.....	viii
Índice de Figuras.....	ix
1. INTRODUCCION	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 HIPÓTESIS.....	5
1.4 OBJETIVOS.....	5
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.4.2 <i>Objetivos Particulares</i>	5
1.5 LIMITACIONES	6
2. REVISION DE LITERATURA.....	6
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.2 BASES TEÓRICAS.....	10
2.2.1 <i>Estadística Descriptiva e Inferencial</i>	10
2.2.2 <i>Que es un Experimento</i>	11
2.2.3 <i>Diseño de Experimentos</i>	13
2.2.4 <i>Diseño Factorial Fraccionado (DFF)</i>	20
2.2.5 <i>Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)</i>	22
2.2.5.1 <i>Diseño Central Compuesto (DCC)</i>	25
2.2.6 <i>Análisis de Varianza</i>	27
2.2.7 <i>Prueba de Hipótesis</i>	27
2.2.8 <i>Proceso de Moldeo por Inyección</i>	28
2.2.9 <i>Capacidad de Proceso - datos anteriores del “Fin Instrument” (con solo una especificación)</i> .	29
2.2.10 <i>Máquina de fabricación de la pieza “Fin Instrument”</i>	33
2.2.11 <i>Material de la Pieza “Fin Instrument”</i>	36
2.2.12 <i>Ficha técnica del material Policarbonato para pieza “Fin Instrument” (proveedor)</i>	40
3. METODOLOGÍA.....	41
3.1 ETAPA1 - OBSERVAR Y CONOCER EL PROCESO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO	41
3.2 ETAPA2 - REUNIR INFORMACIÓN BÁSICA DISPONIBLE DE LA EMPRESA	42
3.3 ETAPA3 - REVISAR Y ANALIZAR LA INFORMACIÓN	42
3.4 ETAPA4 - APLICAR DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	45
3.4.1 <i>Identificación y enunciación del problema</i>	47
3.4.2 <i>Elección de los factores y los niveles</i>	47

3.4.3	<i>Selección de la variable de respuesta</i>	55
3.4.4	<i>Selección del diseño Experimental</i>	56
3.4.4.1	Construcción del Diseño Factorial Fraccionado.....	56
3.4.4.2	Construcción del Diseño Central Compuesto	60
3.5	ETAPA6 - PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN INDUSTRIAS CAMCA.	63
3.6	ETAPA7 - ELABORACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN REQUERIDA.....	63
3.7	ETAPA8 - DESARROLLO DE LA TESIS.....	63
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	64
4.1	DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO	64
4.2	DISEÑO CENTRAL COMPUESTO	69
4.2.1	<i>Optimización de Respuesta para el proceso de inyección “Fin Instrument”</i>	75
4.2.2	<i>Graficas de Contorno y Superficie de “Yijk-Peso” vs cada uno de los pares de factores</i>	78
4.2.3	<i>Validación de Resultados</i>	87
4.3	CAPACIDAD DE PROCESO - DATOS ACTUALES DEL “FIN INSTRUMENT” (CON DOBLE ESPECIFICACIÓN).....	89
5.	CONCLUSION Y RECOMENDACIONES	93
6.	LITERATURA CITADA	95
7.	ANEXOS	98
7.1	ARRANQUE DE MÁQUINA (CHECK-LIST).....	98
7.2	AJUSTE FACTORIAL DEL DFF.....	99
7.3	EFFECTOS LINEALES, DE INTERACCIÓN Y CUADRÁTICOS DEL DCC.....	104

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. VALORES DEL CP Y SU INTERPRETACIÓN (A) (GUTIERREZ & DE LA VARA, 2009).	32
2. CANTIDAD DE PIEZAS MALAS DE ACUERDO A LOS ÍNDICES DE CP (A) (GUTIERREZ & DE LA VARA, 2009).	32
3. PARÁMETROS DE INYECCIÓN PARA VARIAS RESINAS DE LA MÁQUINA EM560-(2).	34
4. FICHA TÉCNICA DE LA MÁQUINA DE MOLDEO CHENDE EASY MASTER V EM560-(2).	35
5. INFORMACIÓN TÉCNICA RESUMIDA DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN EM-560(2).	36
6. FICHA TÉCNICA DEL MATERIAL PARA “FIN INSTRUMENT”.	40
7. FICHA TÉCNICA DEL MATERIAL “FIN INSTRUMENT”.	40
8. PAUTAS GENERALES PARA DISEÑAR UN EXPERIMENTO (MONTGOMERY D. C., 2004).	46
9. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES POTENCIALES - DEFECTO PIEZAS INCOMPLETAS.	51
10. FICHA DE PARÁMETROS PARA “FIN INSTRUMENT”.	53
11. REGISTROS DE PARÁMETROS (DATOS).	54
12. FACTORES SELECCIONADOS PARA EL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO.	54
13. CORRIDAS DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO.	57
14. FICHA DE PARÁMETROS DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO.	58
15. DATOS DE CORRIDAS DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO.	59
16. CORRIDAS DEL DISEÑO CENTRAL COMPUESTO.	61
17. DATOS DE CORRIDAS DEL DISEÑO CENTRAL COMPUESTO.	62
18. CORRIDAS Y PESOS DEL DFF (PARTE1).	64
19. CORRIDAS Y PESOS DEL DFF (PARTE2).	65
20. CORRIDAS Y PESOS DEL DFF (PARTE3).	65
21. CORRIDAS Y PESOS DEL DFF (PARTE4).	66
22. CORRIDAS Y PESOS DEL DFF (PARTE5).	66
23. CORRIDAS Y PESOS DEL DFF (PARTE6).	67
24. CORRIDAS Y PESOS DEL DCC (PARTE1).	70
25. CORRIDAS Y PESOS DEL DCC (PARTE2).	71
26. CORRIDAS Y PESOS DEL DCC (PARTE3).	72
27. CORRIDAS Y PESOS DEL DCC (PARTE4).	73
28. FACTORES PARA LA CORRIDA DE CONFIRMACIÓN (FICHA ACTUALIZADA).	87
29. DATOS DE CORRIDAS DE CONFIRMACIÓN.	88
30. VALORES DEL CP Y SU INTERPRETACIÓN (B) (GUTIERREZ & DE LA VARA, 2009).	91
31. CANTIDAD DE PIEZAS MALAS DE ACUERDO A LOS ÍNDICES DE CP (B) (GUTIERREZ & DE LA VARA, 2009).	92
32. CHECK-LIST DE ARRANQUE DE MÁQUINA EM560-2.	99
33. PATRONES PARA LA GRÁFICA DE PROBABILIDAD NORMAL DE RESIDUOS.	107

INDICE DE GRAFICAS

Grafica	Página
1. HISTOGRAMA DE PESOS ANTERIORES DEL PROCESO “FIN INSTRUMENT”	30
2. PROBABILIDAD DE PESOS ANTERIORES DEL PROCESO “FIN INSTRUMENT”	31
3. PARETO - DEFECTOS DE ENERO “FIN INSTRUMENT”	43
4. PARETO - DEFECTOS DE FEBRERO “FIN INSTRUMENT”	43
5. PARETO - DEFECTOS DE MARZO “FIN INSTRUMENT”	44
6. PARETO GENERAL - DEFECTOS DE ENERO, FEBRERO Y MARZO DEL “FIN INSTRUMENT”	44
7. EFECTOS PRINCIPALES PARA YIJK-PESOS.....	68
8. CONFIGURACIÓN DE FACTORES QUE OPTIMIZA LA RESPUESTA “PESO”	77
9. CONTORNO DE YIJK-PESO VS. PRESIÓN.SOST, PRESIÓN.INY2.	78
10. SUPERFICIE DE RESPUESTA YIJK-PESO VS. PRESIÓN.SOST, PRESIÓN.INY2.....	79
11. CONTORNO DE YIJK-PESO VS. TEMP.MASA, PRESIÓN.INY2.....	80
12. SUPERFICIE DE RESPUESTA YIJK-PESO VS. TEMP.MASA, PRESIÓN.INY2.....	80
13. CONTORNO DE YIJK-PESO VS. TIEMPO.INY, PRESIÓN.INY2.....	81
14. SUPERFICIE DE RESPUESTA YIJK-PESO VS. TIEMPO.INY, PRESIÓN.INY2.....	81
15. CONTORNO DE YIJK-PESO VS. TEMP.MASA, PRESIÓN.SOST.	82
16. SUPERFICIE DE RESPUESTA YIJK-PESO VS. TEMP.MASA, PRESIÓN.SOST.....	83
17. CONTORNO DE YIJK-PESO VS. PRESIÓN.SOST, TIEMPO.INY.	84
18. SUPERFICIE DE RESPUESTA YIJK-PESO VS. PRESIÓN.SOST, TIEMPO.INY.....	84
19. CONTORNO DE YIJK-PESO VS. TIEMPO.INY, TEMP.MASA.....	85
20. SUPERFICIE DE RESPUESTA DE YIJK-PESO VS. TIEMPO.INY, TEMP.MASA.....	85
21. HISTOGRAMA – CORRIDAS DE CONFIRMACIÓN	89
22. INTERACCIONES DE PARÁMETROS DEL DFF.....	102
23. GRAFICA NORMAL DE EFECTOS ESTANDARIZADOS.	103
24. GRAFICA SEMI NORMAL-EFECTOS ESTANDARIZADOS.....	104
25. GRAFICAS DE RESIDUOS PARA YIJK-PESO - DCC.	107

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. PIEZA FIN INSTRUMENT (PARTE INTERNA (1) / PARTE EXTERNA (2)).....	3
2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	10
3. ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	11
4. MODELO GENERAL DE UN PROCESO O SISTEMA (MONTGOMERY D. C., 2004).....	14
5. DISEÑO FACTORIAL COMPLETO Y FRACCIONADO.....	21
6. SUPERFICIE DE RESPUESTA TRIDIMENSIONAL DONDE SE INDICA EL RENDIMIENTO ESPERADO (N) COMO UNA FUNCIÓN DE TEMPERATURA (X_1) Y LA PRESIÓN (X_2).....	23
7. GRAFICA DE CONTORNO DE UNA SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	23
8. EL CARÁCTER SECUENCIAL DE LA MSR.....	25
9. DISEÑOS CENTRALES COMPUESTOS PARA $K = 2$ Y $K = 3$	25
10. ESTRUCTURA EXTERNA DE LA MÁQUINA EM560-(2) DE MOLDEO POR INYECCIÓN.....	33
11. PARTES PRINCIPALES DE UNA MÁQUINA DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO.....	33
12. FORMULA CONDENSADA DEL POLICARBONATO.....	37
13. GARRAFONES DE POLICARBONATO.....	38
14. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO DEL "FIN INSTRUMENT".....	41
15. LAYOUT DEL ÁREA DE TRABAJO - MÁQUINA EM-560(2).....	42
16. EQUIPO DEL PROYECTO DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	46
17. ISHIKAWA PIEZAS INCOMPLETAS (CAUSA-EFECTO).....	50
18. PONDERACIONES QUE AFECTAN LA FORMA DE LA FUNCIÓN DE DESEABILIDAD.....	75

1. INTRODUCCION.

Investigadores de prácticamente todos los campos de estudio llevan a cabo experimentos, generalmente para descubrir algo acerca de un proceso o sistema particular (Montgomery D. C., 2004). Las personas realizan experimentos frecuentemente por ejemplo; trabajadores de una ciudad buscan el camino más corto y/o rápido para llegar a trabajar, en cada casa se experimenta con las recetas de cocina para mejorar el sabor de los platos servidos o se analizan distintas alternativas para mejorar el estado físico (Ryan, 2007).

En la industria, la experimentación suele utilizarse básicamente en dos áreas: el diseño y la mejora de procesos y productos. La experimentación proporciona en estos casos la descripción aproximada de cómo se comportan los procesos y/o productos, restringida a una región de interés. La mejora de los procesos es generalmente el objetivo hasta que este alcanza el nivel deseado (Ryan, 2007). Pero, la mayoría de los problemas industriales, están condicionados por el tiempo y el presupuesto, lo que supone una limitación importante a la hora de experimentar. Por eso todas las empresas deberían intentar responder antes de realizar sus experimentos la siguiente pregunta: ¿Cómo puedo obtener de los experimentos la mayor información posible y de la manera más eficiente?.

El molde por inyección es un importante proceso de manufactura de polímeros; que provee productos con alta estabilidad dimensional. Por lo tanto, es un proceso ampliamente utilizado para materiales poliméricos (Brent, 2000).

La bibliografía Montgomery (2005) clasifica las estrategias utilizadas para llevar a cabo las experimentaciones en las empresas en tres categorías: mejor acierto (Best Guess), un-factor-por-vez (OFAT) y siguiendo una metodología estadística (DOE). La estrategia de “mejor acierto” consiste en, utilizando el conocimiento previo sobre el proceso en cuestión, modificar las variables involucradas y conducir las pruebas bajo condiciones en las cuales se esperan los mejores resultados. Dicho estrategia carece de rigor científico ya que se basa únicamente en la intuición y la experiencia. La estrategia de “un-factor-por-vez” consiste en ir modificando cada vez un solo factor (variable) y distinguir los efectos

que tiene sobre la respuesta cada factor por separado. Esta estrategia, a pesar de ser la más utilizada en las empresas y seguir el “método científico”, es ineficiente para hallar las mejores condiciones del proceso. Además, no detectan sistemáticamente las posibles relaciones (interacciones) que pueden existir entre varios factores (Czitrom, 1999).

Es por ello necesario, y más eficiente en términos de los resultados obtenidos y número de experimentos, utilizar como estrategia para la experimentación una metodología estadística preestablecida para poder planificar y analizar correctamente los experimentos. Como afirma Deming (1982) (considerado uno de los padres de la Calidad Total) “no hay conocimiento que pueda contribuir tanto a mejorar la calidad, la productividad y la competitividad como el de los métodos estadísticos”.

La metodología estadística por excelencia para optimizar la experimentación se conoce como Diseño de Experimentos, la cual se abrevia como DDE o DOE proveniente de su significado en inglés: “Design of Experiments”. Se define simplemente como un método para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación. Más precisamente, puede ser definido como realizar un conjunto de pruebas en las cuales se realizan cambios voluntarios a los parámetros de control de un proceso o sistema, para observar e identificar las razones de los cambios en la variable de salida o respuesta del proceso (Montgomery D. C., 2005).

Esta tesis presenta la aplicación de un Diseño de Experimentos para la mejora de un problema de calidad; en este caso del defecto denominado “piezas incompletas” de la pieza llamada “Fin Instrument” de un proceso de moldeo por inyección de plástico. Se incluyen los resultados de los experimentos, así como su posterior análisis.

1.1 Planteamiento del problema.

La empresa Industrias Camca S. A. de C. V., es una empresa maquiladora que fabrica piezas para el sector automotriz y el sector de electrodomésticos.

A finales del mes de diciembre del 2011 dio inicio la fabricación de la pieza llamada "Fin Instrument" (Figura 1), la cual va dirigida para el automóvil Tiida de Nissan. Esta pieza fue incrementando en cuanto a nivel de rechazo interno (desperdicio), generando un número considerable de defectos en la pieza, que por consecuencia impactan de manera significativa en cuanto a costo, siendo una de las piezas más caras de fabricación de la empresa y afectando la calidad como producto terminado. Todo esto provocando insatisfacción del cliente y al mismo tiempo insatisfacción interna en la empresa.

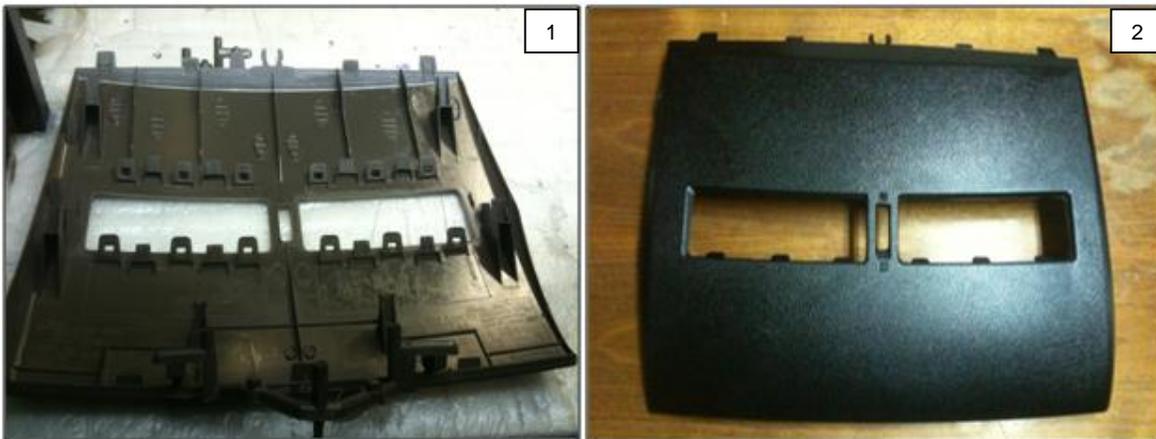


Figura 1. Pieza Fin Instrument (parte interna (1) / parte externa (2)).

Al inicio del proyecto y durante el transcurso de los meses de enero, febrero y marzo del presente año 2012 se generó un 6.90% de desperdicio causado generalmente por todos los defectos de la pieza "Fin Instrument". Por lo tanto, se realizó una estimación del costo del desperdicio generado durante esos meses, los cuales provocaron pérdidas de aproximadamente \$301,621.72 pesos.

Los defectos que se han identificado en la pieza "Fin Instrument" son: piezas incompletas, ráfagas, rebaba, deformación, degradación, mordidas, rayas, mal pigmentado, rechupe, fractura, quemadas, lechoso, contaminación y fuera de dimensión.

1.2 Justificación.

Actualmente las Industrias Automotrices donde utilizan la técnica de moldeo por inyección de plástico como parte de la práctica tradicional, se basan profundamente en gran medida por expertos, diseñadores de productos, diseñadores de moldes e ingenieros de procesos, quienes requieren un alto nivel de conocimientos específicos, así como experiencia y criterio (Kwai-Sang & Wong, 1996). Por desgracia, la industria en general está presionada en tiempo para tomar decisiones y la falta de una metodología para reaccionar al instante dificulta su entendimiento y repetitividad de procesos. Los métodos estadísticos pueden proveer una estructura adecuada, en específico en el moldeo por inyección de plástico las variables de procesos pueden determinar la calidad final de las piezas producidas, por lo que es primordial entender como introducir cambios en estas variables.

Tradicionalmente, los ingenieros utilizan ensayo y error en los procesos, que depende de la experiencia de los ingenieros e intuición inicial para decidir los ajustes de los parámetros del proceso. Sin embargo, el proceso de ensayo y error es costoso e ineficiente. Como resultado de la consideración anterior, muchos de los investigadores han desarrollado modelos para determinar el proceso óptimo de configuración inicial de parámetros en los procesos de moldeo por inyección de plástico (Chin-Huang et al., 2010).

El Diseño de Experimentos (DOE) ha sido una herramienta muy útil para diseñar y analizar problemas complicados. Ayudando a comprender las características del proceso y a investigar cómo un conjunto de variables afectan a las respuestas. Además, se ha utilizado de forma sistemática para determinar los parámetros de proceso óptimos con menos pruebas de ensayos y menor cantidad de recursos. El enfoque DOE es un método que ha sido ampliamente utilizado en los procedimientos industriales de diseño robusto. Varias empresas han realizado estudios sobre el diseño de los procesos de moldeo por inyección utilizando el enfoque DOE.

1.5 Limitaciones.

- Disponibilidad del molde y la máquina de inyección donde se fabrica la pieza "Fin Instrument".
- Disponibilidad de tiempo del personal involucrado en el proceso.
- Problemas que surjan sobre el transcurso del desarrollo del proyecto en el molde, máquina y material de la pieza.

2. REVISION DE LITERATURA.

2.1 Antecedentes de la Investigación.

En las últimas décadas los plásticos han incrementado notablemente. El principal factor que ha impulsado su crecimiento es, sin duda, la facilidad y economía de transformación de estos materiales, en especial de los termoplásticos, que permiten la fabricación de grandes series con costos relativamente bajos; es por ello que el crecimiento en el uso de los plásticos se ha producido sobre todo en productos de consumo. Entre todos los procesos de transformación destaca el proceso de inyección, que gracias a ciclos rápidos de producción, está permitiendo que los materiales poliméricos estén reemplazando a metales, maderas, vidrios, resolviendo necesidades del avance tecnológico (Boronat, 2009).

El Moldeo de plástico por inyección tiene muchas ventajas, tales como ciclos cortos de producción, piezas de alta calidad, con buenas propiedades mecánicas. Produce productos de peso ligero, por lo que la producción de plástico es cada vez más importante en las industrias de hoy.

Desde que la calidad de las piezas moldeadas por inyección de plástico ha sido influenciada por muchas variables del proceso, la determinación de las condiciones óptimas se ha convertido en la clave para mejorar la calidad de la manufactura de piezas (Kwai-Sang & Wong, 1996). Este proceso consiste en la inyección de un polímero fundido en un molde, la masa fundida se enfría y se solidifica para formar un producto de plástico. Su popularidad se caracteriza por

los numerosos productos elaborados de esta manera actualmente (Seow & Lam, 1997).

Técnicamente, los plásticos son sustancias de origen orgánico formadas por largas cadenas macromoleculares, que principalmente contienen en su estructura carbono e hidrógeno. Se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas, de origen sintético o natural, y es posible moldearlos mediante procesos de transformación, aplicando calor y presión (Castillo Reyna, 2007).

El ciclo de moldeo por inyección de plástico consta de cuatro fases: inyección, compresión, la plastificación, y enfriamiento. Por lo tanto, existen varios parámetros que afectan la calidad de moldeo por inyección como el tiempo de enfriamiento, la presión de inyección, la velocidad de inyección, el tiempo de llenado, la temperatura de la masa, la presión de expulsión, la temperatura de moldeo, la presión de empaque, etc., (Chin-Huang et al., 2010). Los defectos en los productos de plástico tales como deformación, contracción, marcas de hundimiento, la tensión residual, etc., son causados por la variación de los factores mencionados anteriormente (Ozcelik & Erzurumlu, 2005). Dos de esos parámetros como la presión y la temperatura deben ser monitoreados durante todo el proceso, ya que estos influyen de manera directa en la fluidez del material, el moldeo de la pieza y en la calidad final de la misma (Castillo Reyna, 2007). Los efectos de las variables de moldeo sobre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales termoplásticos han sido estudiados por investigadores (Chin-Huang et al., 2010; Chen et al., 2008; Chien et al., 2004; SadAbadi & Ghasemi, 2007).

Los defectos de moldeo por inyección también surgen de etapas anteriores al moldeo por inyección de plástico, como: el tratamiento de pre-procesamiento de la resina plástica antes del proceso de moldeo por inyección, la selección de la máquina y el establecimiento de los parámetros del proceso, equipos auxiliares. Estos defectos no sólo afectan a la estética de la moldura, en muchas circunstancias afectan tanto a su funcionalidad y rendimiento en su vida útil (Lau & Tse, 1997). Todos los parámetros del proceso de moldeo por inyección de plástico

influyen potencialmente en la calidad de los productos moldeados por inyección de plástico (Chin-Huang et al., 2010).

Tener un buen control de proceso permite la compensación de perturbaciones, ya que es la base para una calidad reproducible de las piezas fabricadas. El objetivo de dicho control del proceso reside en la demanda de un proceso que se produce de manera idéntica en cada ciclo de producción y que está representado por diversas variables del proceso, especialmente la presión y la temperatura de la masa fundida en la cavidad (Schreiber & Michaeli, 2009).

Muchos de los productos en diferentes áreas como la aviación, automotriz y aparatos electrónicos son producidos por el moldeo de inyección de plástico. Con características especiales, con la capacidad para producir piezas complejas con peso ligero, resistencia a la corrosión y con manufacturabilidad competitivas respecto de los materiales convencionales, son las principales razones de su popularidad. Alta calidad y precisión se pueden lograr usando este método para la fabricación de piezas de plástico. Como la mayoría de los plásticos fundidos no pueden llenar la cavidad de moldes de las piezas que son muy delgadas, el moldeo por inyección de plástico puede dar lugar a la deformación. Por lo tanto, la reducción y control de la distorsión es de suma importancia en la mejora de la calidad, ya que la minimización de la deformación en los productos de plástico juega un papel clave en la optimización del producto (Farshi et al., 2011).

El proceso de moldeo por inyección es el más popular para la fabricación de piezas de termoplásticos. El diseño conceptual de una parte de moldeo por inyección es un gran proceso iterativo, lo que implica un componente substancial de los procesos de plásticos (conocimiento heurístico¹) respecto de las necesidades del cliente. Que forman parte de los requisitos de diseño, selección de materiales, características de diseño de moldes, procesos de fabricación de moldes, máquinas de moldeo y costo de la producción (Kwai-Sang & Wong, 1996).

¹ **Heurística:** es la capacidad de un sistema para realizar de forma inmediata innovaciones positivas para sus fines. La capacidad heurística es un rasgo característico de los humanos, desde cuyo punto de vista puede describirse como el arte y la ciencia del descubrimiento y de la invención o de resolver problemas mediante la creatividad y el pensamiento lateral o pensamiento divergente.

Las características de calidad de productos del moldeo por inyección de plástico se pueden clasificar de acuerdo a las propiedades dimensionales, propiedades de superficie y propiedades mecánicas. La inadecuada configuración de los parámetros en el proceso puede causar muchos defectos en los productos. Así, con la configuración adecuada de los parámetros de fabricación se puede acortar el tiempo de ciclo de producción y mejorar la calidad de los productos fabricados por moldeo de inyección de plástico (Chin-Huang et al., 2010).

Otro de los principales problemas del moldeo de partes por inyección de plástico es la deformación. Esta deformación está fuertemente influenciada por enfriamiento no uniforme, la contracción diferencial y los efectos de orientación (Fischer, 2003). Lotti, Ueki, and Bretas (2002) encontraron que la presión de sostenimiento y la temperatura del molde contribuyen significativamente con el defecto de contracción de las piezas.

Por lo tanto, varias industrias han utilizado el método de Diseño Estadístico de Experimentos (Design of Experiments) para mejorar los productos o procesos de fabricación. Es un método potente y eficaz para resolver problemas de calidad. Es un método utilizado con bastante éxito en varias aplicaciones industriales como en la optimización de los procesos de fabricación (Puertas, 2004; Sofuoglu, 2006; Tong, 2004; Yang, 2006a; Yang, 2006b).

2.2 Bases teóricas.

2.2.1 Estadística Descriptiva e Inferencial.

El campo de la estadística trata la variación en las siguientes formas:

a) Estadística Descriptiva:

Describe un conjunto de datos con gráficas y unos cuantos números que resumen una gran cantidad de información (media, varianza, desviación estándar).

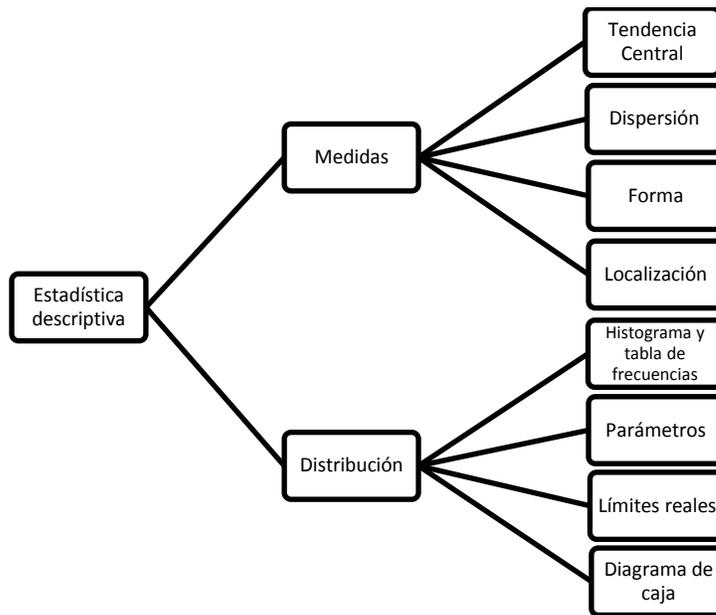


Figura 2. Estadística descriptiva.

b) Estadística Inferencial:

Determina cuando las diferencias en los resultados pueden deberse a variación aleatoria y cuando las diferencias en los resultados pueden asignarse a factores o variables (Intervalos de Confianza, pruebas de hipótesis, Anova, regresión, modelos lineales y lineales generalizados).

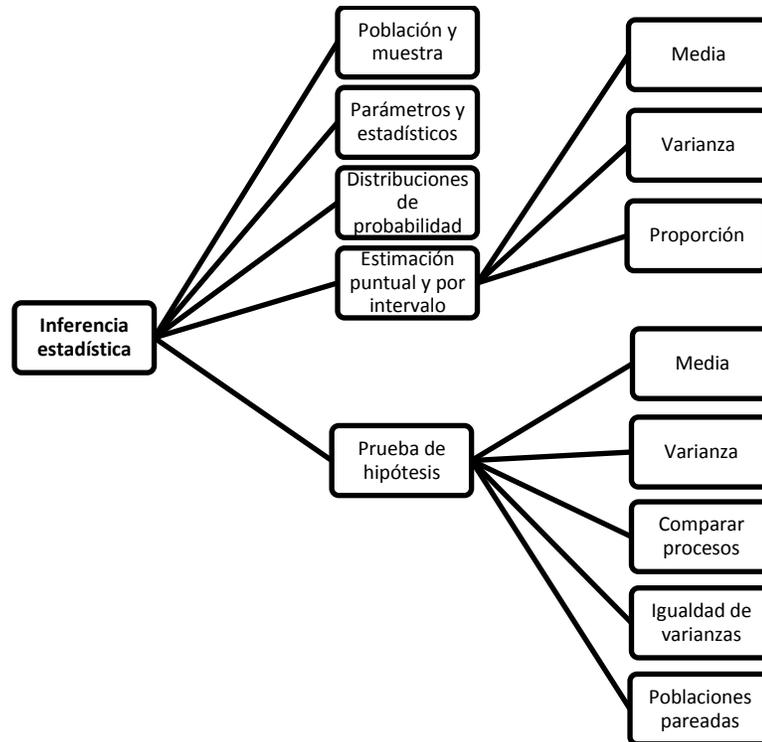


Figura 3. Estadística Inferencial.

2.2.2 Que es un Experimento.

El término "Experimento" se refiere a la creación y preparación de lotes de prueba que verifiquen la validez de las hipótesis establecidas sobre las causas de un determinado problema o defecto, objeto de estudio. En un Experimento, el experimentador escoge ciertos factores para su estudio, los altera deliberadamente de forma controlada y después, observa el efecto resultante.

Componentes de un Experimento.

Variable:

Característica de un objeto que puede ser observada y que puede tomar diferentes valores, tanto en el mismo objeto como entre diferentes objetos. Con base a la posibilidad de medida se distinguen dos tipos fundamentales de variables:

- Variables cuantitativas: son las variables que pueden medirse, cuantificarse o expresarse numéricamente. Las variables cualitativas pueden ser de dos tipos:
 - Variables cuantitativas continuas, si admiten tomar cualquier valor dentro de un rango numérico determinado (edad, peso, talla).
 - Variables cuantitativas discretas, si no admiten todos los valores intermedios en un rango. Suelen tomar solamente valores enteros (número de hijos, número de partos, número de hermanos, etc.).
- Variables cualitativas: Este tipo de variables representan una cualidad o atributo que clasifica a cada caso en una de varias categorías. La situación más sencilla es aquella en la que se clasifica cada caso en uno de dos grupos (hombre/mujer, enfermo/sano, fumador/no fumador). Son datos dicotómicos o binarios. Como resulta obvio, en muchas ocasiones este tipo de clasificación no es suficiente y se requiere de un mayor número de categorías (color de los ojos, grupo sanguíneo, profesión, etcétera). La variable de respuesta, es la variable que se mide en cada repetición del experimento (tratamiento) con el objetivo de ver si la variable independiente influye directamente sobre sus valores, y es su valor el que se busca siempre mejorar u optimizar por medio del diseño de experimentos.

Tipos de variables en un diseño de Experimentos:

- Variable independiente o factor:
Es una característica de un objeto que puede ser observada, medida y analizada para encontrar las respuestas al problema en cuestión. Son la causa que se cree que influye directamente sobre la característica que se está estudiando. Es el factor (causa) que suponemos influye sobre la característica que medimos (defecto, error, etc.). Para comprobar su influencia, el investigador la manipulará durante el Experimento, en el sentido que le asignará valores diferentes a cada observación.
- Variable dependiente:
Es aquella variable que se mide en cada observación del Experimento, para establecer si la variable independiente efectivamente influye sobre sus valores.
- Variables extrañas:
Son todas aquellas que el investigador no puede manipular, pero influyen en la variable dependiente. Son la causa de que las observaciones en un

mismo nivel de tratamiento no necesariamente arrojen el mismo valor de medida. El conjunto de variables extrañas se denomina generalmente en el Diseño y Análisis de Experimentos "ruido" o "error experimental".

- **Variable de bloqueo:**

Es una variable que sabemos puede intervenir en los niveles de la variable dependiente y decidimos eliminar su influencia mediante el control de la misma, creando bloques de observaciones, en los que esta variable, asume respectivamente un valor constante. A cada bloque se asignarán todos los niveles de tratamiento.

Con la creación de bloques se persiguen dos objetivos: aislar el efecto de los tratamientos, eliminando la influencia de la variable de bloqueo y estimar los efectos de los bloques.

Unidad experimental.

La unidad experimental es la unidad básica sobre la cual se efectúa el proceso de medida, es decir, es donde se realizara el experimento. Pueden ser desde espacios físicos, personas, cosas abstractas o bien intervalos de tiempo.

Niveles o tratamientos.

Son los diferentes valores que se le asignan a la variable independiente o factor con el objeto de verificar de qué manera se ve afectado el resultado en función de cada nivel.

2.2.3 Diseño de Experimentos.

Son modelos estadísticos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en la variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificarla. La metodología se basa en la experimentación (Del Vecchio, 1997). Permite la mayor economía de recursos experimentales para obtener información con la menor incertidumbre o error experimental. Los modelos de diseño de experimentos además de permitir planificar la secuenciación de los ensayos.

El diseño de experimentos es una herramienta que nos da la facultad de planear una prueba o serie de pruebas para obtener conclusiones válidas y objetivas acerca de los procesos, con una cantidad mínima de corridas experimentales. Para contar con conclusiones válidas en el análisis obtenido sobre

los datos, es pertinente validar los modelos estadísticamente (Walpole, 1999). En el campo de la ingeniería, el diseño de experimentos cumple un papel importante en los procesos de manufactura en diversos aspectos, incluyendo la mejora y desarrollo de procesos y el diseño de nuevos productos. En general en la actualidad se requieren procesos óptimos en términos de la menor variabilidad, con el fin de garantizar la calidad (Montgomery D. C., 2004).

Se sabe que si se repite un experimento, en condiciones indistinguibles, los resultados presentan variabilidad que puede ser grande o pequeña. Si la experimentación se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están muy controladas, el error experimental será pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento. Pero si se experimenta en procesos industriales o administrativos, la variabilidad es grande en la mayoría de los casos.

El objetivo de diseño de experimentos es estudiar si cuando se utiliza un determinado tratamiento produce una mejora en el proceso o no. Para ello se debe experimentar utilizando el tratamiento. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento, cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación.

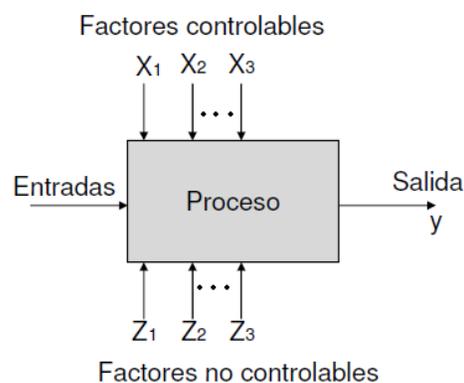


Figura 4. Modelo general de un proceso o sistema (Montgomery D. C., 2004).

La metodología del diseño de experimentos estudia cómo variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta, de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés, al menor costo. Además el diseño de experimentos permite obtener un modelo estadístico-matemático con el que se pueden hacer predicciones de respuestas futuras. Para que la metodología de diseño de experimentos sea eficaz es fundamental que el experimento esté bien diseñado.

El Diseño de un Experimento debe garantizar que este cumpla ciertos requisitos mínimos:

- Debe poder comprobar las hipótesis objeto de estudio, no dejándose confundir por variables de ruido, como errores de medida desproporcionados, etc.
- Debe poder revelar la existencia de cualquier causa importante de variación, aunque no haya sido adelantada como hipótesis.
- Debe mantener los costos de experimentación a un nivel razonable, en comparación con el problema objeto de estudio.
- Debe tener un alto grado de seguridad en las respuestas.
- Si el Experimento se realiza en un laboratorio, éste ha de ser, respecto a las variables estudiadas, un buen indicador de las pruebas que se obtendrían en el taller o "in situ²".
- Si el Experimento se realiza durante el desarrollo normal del proceso en estudio, se tendrá además cuidado de interferir lo menos posible en el trabajo normal y protegerse de las interferencias no autorizadas o involuntarias en la prueba por parte del personal adepto.

Un experimento se realiza principalmente por alguno de los siguientes motivos:

- Determinar las principales causas de variación en la respuesta.
- Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o respuesta.
- Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

² In situ: significa "en lugar, en el sitio".

Planificación de los Experimentos.

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones.

Principios básicos del Diseño de Experimentos.

Hay tres principios básicos en el diseño estadístico de experimentos:

1) Realización de Réplicas o Repetición del Experimento Básico.

Porque en el experimento:

- Proporciona una estimación del error experimental.
- Permite obtener una estimación más precisa del efecto medio de cualquier factor.
- Unidad Experimental a la cual se le aplica un solo tratamiento (que puede ser una combinación de muchos factores) en una reproducción del experimento.
- Error Experimental Describe la situación de no llegar a resultados idénticos con dos unidades experimentales tratadas idénticamente y refleja:
 - Errores de experimentación.
 - Errores de observación.
 - Errores de medición.

El error experimental puede reducirse:

- Usando material experimental más homogéneo o por estratificación cuidadosa del material disponible.

- Utilizando información proporcionada por variables aleatorias relacionadas.
- Teniendo más cuidado al dirigir y desarrollar el experimento.
- Usando un diseño experimental muy eficiente.
- Variación del material experimental (esto es, entre unidades experimentales). Efectos combinados de factores extraños que pudieran influir las características en estudio, pero respecto a los cuales no se ha llamado la atención en la Investigación.

Confusión: Dos o más efectos se confunden en un experimento si es posible separar sus efectos, cuando se lleva a cabo el subsecuente análisis estadístico.

Repetición.

Es completar una corrida más de una vez sin reajustar las variables independientes. Ejemplo: reunir tres partes consecutivas, medir cada parte y usar el promedio de las tres mediciones como la respuesta para cada corrida.

Las repeticiones pueden usarse para compensar la variación en la medición y la variación del proceso a corto plazo sin ocasionar el gasto adicional de reajustar el proceso a las condiciones deseadas.

Replica.

Es completar una corrida más de una vez, reajustando los factores cada vez. Ejemplo: la réplica puede implicar que se vuelvan a correr todas las condiciones experimentales en otra ocasión en fecha posterior.

La réplica es mejor (y generalmente es más costosa) que la repetición, debido a que está demostrando una mayor capacidad para generalizar los resultados. Esto también permite variación de los arreglos del sistema para que sea incluido en el experimento.

2) Aleatorización: es la Asignación al azar de tratamiento a las unidades experimentales. Una suposición frecuente en los modelos estadísticos de diseño de experimentos en que las observaciones o los errores en ellas

están distribuidos independientemente. La aleatorización hace válida esta suposición.

- 3) Formación de Bloques:** distribución de las unidades experimentales en bloques, de manera que las unidades dentro de un bloque sean relativamente homogéneas, de esta manera, la mayor parte de la variación predecible entre las unidades queda confundida con el efecto de los bloques.

Etapas de un Diseño de Experimentos.

- 1) Enunciado o planteamiento del problema.
- 2) Formulación de hipótesis.
- 3) Proposición de la técnica experimental y el diseño.
- 4) Examen de sucesos posibles y referencias en que se basan las razones para la indagación que asegure que el experimento proporcionará la información requerida y en la extensión adecuada.
- 5) Consideración de los posibles resultados desde el punto de vista de los procedimientos estadísticos que se aplicarán y para asegurar que se satisfagan las condiciones necesarias para que sean válidos estos procedimientos.
- 6) Ejecución del experimento.
- 7) Aplicación de las técnicas estadísticas a los resultados experimentales.
- 8) Extracción de conclusiones con medidas de la confiabilidad de las estimaciones generadas. Deberá darse cuidadosa consideración a la validez de las conclusiones para la población de objetos o eventos a la cual se van a aplicar.
- 9) Valoración de la investigación completa y contrastación con otras investigaciones del mismo problema o similares.

Ventajas y Desventajas de los Experimentos Diseñados Estadísticamente.

Ventajas:

- Se requiere una estrecha colaboración entre los estadísticos y el investigador o científicos, con las consiguientes ventajas en el análisis e interpretación de las etapas del programa.
- Se enfatiza respecto a las alternativas anticipadas y respecto a la pre-planeación sistemática, permitiendo aun la ejecución por etapas y la

producción única de datos útiles para el análisis en combinaciones posteriores.

- Debe enfocarse la atención a las interrelaciones y a la estimación y cuantificación de fuentes de variabilidad en los resultados.
- El número de pruebas requerido puede determinarse con certeza y a menudo puede reducirse, dado un error experimental aceptable.
- La comparación de los efectos de los cambios es más precisa debido a la agrupación de resultados.
- La exactitud de las conclusiones se conoce con una precisión matemáticamente definida.

Desventajas:

- Tales diseños y sus análisis, usualmente están acompañados de enunciados basados en el lenguaje técnico del estadístico.
- Muchos diseños estadísticos, especialmente cuando fueron formulados por primera vez, se han criticado como demasiado caros, complicados y que requieren mucho tiempo. Tales críticas, deben aceptarse y debe hacerse un intento honesto para mejorar la situación, siempre que no sea en detrimento de la solución del problema.

Tipos de Diseños de Experimentos.

1. Diseño para comparar dos o más tratamientos:
 - a) Diseño completamente al azar.
 - b) Diseño de bloques completos al azar.
 - c) Diseños en Cuadros Latinos y Greco Latinos.
2. Diseño para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuestas:
 - a) Diseño factoriales 2×2 .
 - b) Diseño factoriales 3×4 .
 - c) Diseños factoriales fraccionados 2^k .
3. Diseño para optimización de procesos:

De 1er. Orden:

 - a) Diseño factoriales 2^k y 2^{k-p} .
 - b) Diseño de Plakett - Burman.
 - c) Diseños Simplex.

De 2do. Orden:

- a) Diseño factoriales 3^k y 3^{k-p} .
- b) Diseño central compuesto.
- c) Diseños de Box Behnken.

4. Diseño Robusto:

- a) Arreglos Ortogonales (Diseño factoriales).
- b) Diseño con arreglos internos y externos.

2.2.4 Diseño Factorial Fraccionado (DFF).

Es un diseño en el cual los que experimentan realizan sólo un subconjunto seleccionado o una "fracción" de las corridas en el diseño factorial completo. Los diseños factoriales fraccionados son una buena elección cuando los recursos son limitados o el número de factores en el diseño es grande debido a que utilizan menos corridas que los diseños factoriales completos.

El número de corridas necesarias para un diseño factorial completo de 2 niveles es 2^k donde k es el número de factores. Como el número de factores en un diseño de 2^k se incrementa, el número de corridas para realizar un diseño factorial completo se incrementa rápidamente. Por lo tanto, el diseño rebasa con rapidez los recursos de la mayoría de los experimentadores (Montgomery D. C., 2004).

En los diseños factoriales fraccionados, algunos de los efectos son confusos y no se pueden separar de los demás efectos. Usualmente, no nos preocupa cualquier término mayor que la interacción de 2 factores y podemos asumir que los efectos de interacciones de orden más elevadas son insignificantes; de manera que no hay necesidad de estimarlos. Un diseño factorial fraccionado utiliza un subconjunto de un diseño factorial completo para obtener información acerca de los efectos principales e interacciones de orden bajo con menos corridas. La siguiente figura 5 muestra un diseño factorial completo versus un $\frac{1}{2}$ diseño factorial fraccionado.

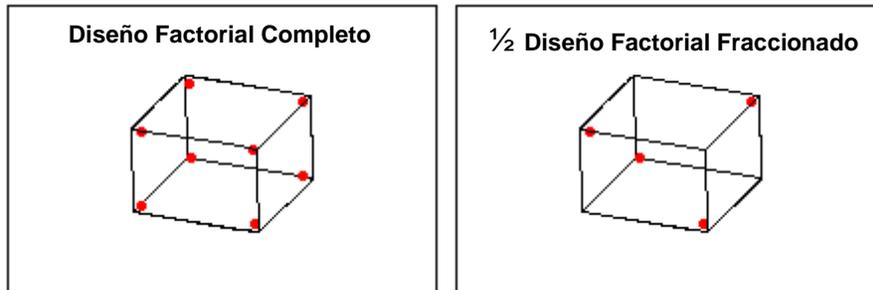


Figura 5. Diseño Factorial Completo y Fraccionado.

El diseño factorial completo contiene dos veces tantos puntos de diseño como el $\frac{1}{2}$ diseño de fracción. La respuesta se mide sólo en los cuatro de los ocho puntos axiales posibles de la porción factorial del diseño. Sin embargo, con este diseño, los efectos principales se confundirán con las interacciones de 2 factores.

Una de las principales aplicaciones de los diseños factoriales fraccionados es en los experimentos de tamizado o exploración. Se trata de experimentos en los que se consideran muchos factores y el objetivo es identificar aquellos factores (en caso de haberlos) que tienen efectos grandes. Los experimentos de tamizado suelen realizarse en las etapas iniciales de un proyecto, cuando es posible que muchos de los factores considerados en un principio tengan un efecto reducido o nulo sobre la respuesta. Entonces los factores que se identifican como importantes se investigan con mayor detalle en experimentos subsecuentes (Montgomery D. C., 2004).

El uso exitoso de los diseños factoriales fraccionado, se basa en tres ideas clave:

1. El principio de efectos esparcidos o escasez de efectos. Cuando hay variables, es posible que el sistema o proceso este dominado principalmente por algunos de los efectos principales y las interacciones de orden inferior.
2. La propiedad de proyección. Los diseños factoriales fraccionados pueden proyectarse en diseños más fuertes (más grandes) en el subconjunto de los factores significativos.
3. Experimentación secuencial. Es posible combinar las corridas de dos (o más) diseños factoriales fraccionados para ensamblar secuencialmente un

diseño más grande para estimar los efectos de los factores y las interacciones de interés.

Resolución del Diseño.

En general, la resolución de un diseño factorial fraccionado de dos niveles es igual al menor número de letras en cualquier palabra de la relación de definición. Por lo cual, los diseños precedentes podrían denominarse diseño de tres, cuatro y cinco letras, respectivamente. Por lo común, es preferible emplear diseños fraccionados que tengan la resolución más alta posible que sea consistente con el grado de fraccionamiento requerido. Entre más alta sea la resolución, menos restrictivos serán los supuestos que se requieren respecto de cuáles de las interacciones son insignificantes para obtener una interpretación única de los datos (Montgomery D. C., 2004).

2.2.5 Metodología de Superficie de Respuesta (MSR).

Es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar esta respuesta.

Por lo general la superficie de respuesta se representa gráficamente como en la figura 6, donde "n" se grafica contra los niveles de x_1 y x_2 . 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 7. En la gráfica de contorno se trazan las líneas de respuesta constante en el plano de x_1 , x_2 . Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta.

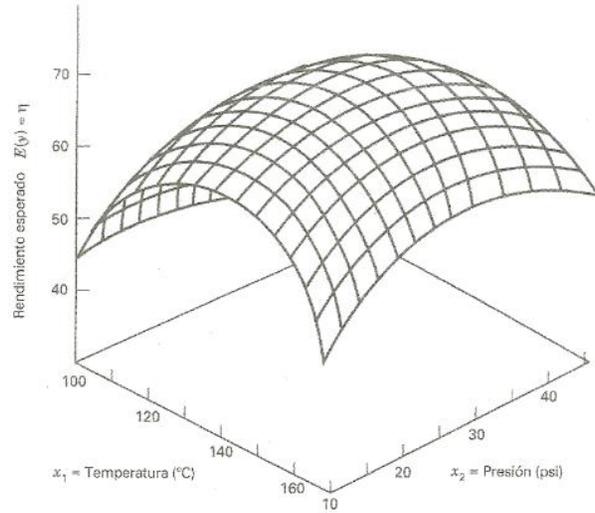


Figura 6. Superficie de respuesta tridimensional donde se indica el rendimiento esperado (η) como una función de temperatura (x_1) y la presión (x_2).

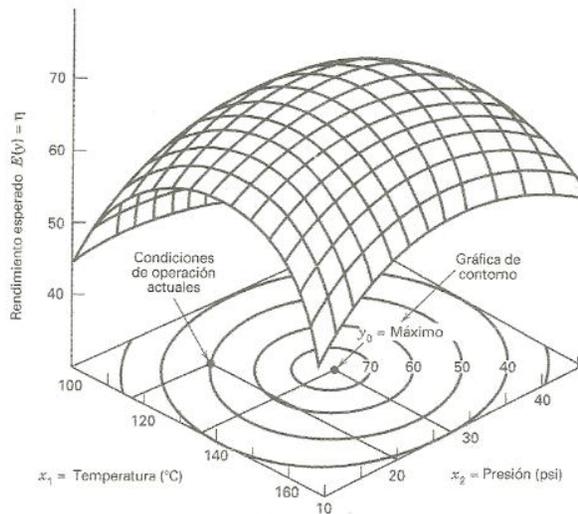


Figura 7. Gráfica de contorno de una superficie de respuesta.

En la mayoría de los problemas MSR, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo cual, el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre “ y ” y el conjunto de variables independientes. Por lo general se emplea un polinomio de orden inferior en alguna región de las 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:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon$$

Si hay curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de orden superior, tal como el modelo de segundo orden:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

En casi todos los problemas MSR se usa uno de estos modelos, o ambos. Desde luego, es probable que un modelo polinomial sea una aproximación razonable de la verdadera relación funcional en el espacio completo de las variables independientes, pero para una región relativamente pequeña suelen funcionar bastante bien.

La MSR es un procedimiento secuencial. Muchas veces, cuando se está en un punto de la superficie de respuesta que esta apartado del óptimo, como en el caso de las condiciones de operación actuales de la 'figura 8', el sistema presenta una curvatura moderada y el modelo de primer orden será apropiado. El objetivo en este caso es llevar al experimentador de manera rápida y eficiente por la trayectoria del mejoramiento hasta la región general del óptimo. Una vez que se haya encontrado la región del óptimo, puede emplearse un modelo más elaborado, como el de segundo orden, y llevarse a cabo un análisis para localizar el óptimo. En la 'figura 8' se puede ver que el análisis de una superficie de respuesta pueda considerarse como "el ascenso a una colina", donde la cima de esta representa el punto de la respuesta máxima. Si el verdadero optimo es un punto de respuesta mínima, entonces la situación puede considerarse como "el descenso a un valle".

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.

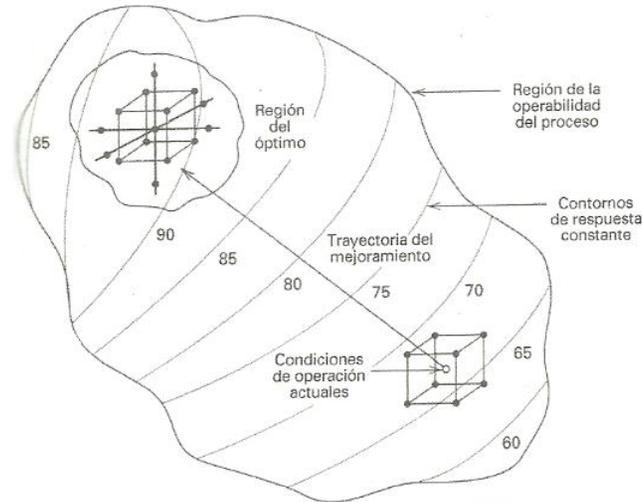


Figura 8. El carácter secuencial de la MSR.

2.2.5.1 Diseño Central Compuesto (DCC).

Es el más popular de diseños para ajustar modelos. En general, el DCC consta de un factorial 2^k (o de un factorial fraccionado de resolución V) con n_F corridas axiales o estrella y n_C corridas centrales. En la figura 9 se muestra el DCC para $k=2$ y $k=3$ factores.

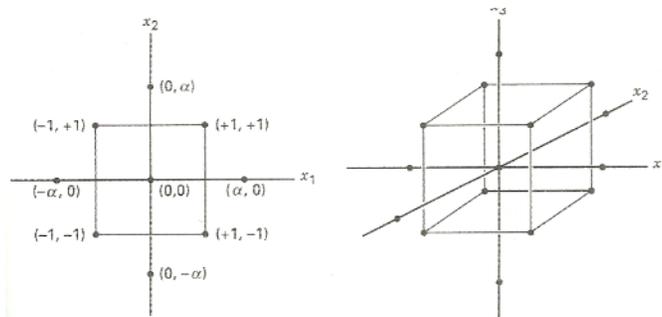


Figura 9. Diseños centrales compuestos para $k = 2$ y $k = 3$.

El despliegue práctico de un DCC surge con frecuencia a través de la experimentación secuencial, como en los ejemplos de la figura 5 y 6. Es decir, se ha usado un diseño 2^k para ajustar el modelo de primer orden, este modelo ha presentado falta de ajuste, y después se agregaron las corridas axiales para permitir la incorporación de los términos cuadráticos en el modelo. El DCC es un diseño muy eficiente para ajustar el modelo de segundo orden. Hay dos parámetros en el diseño que deben especificarse: la distancia α de las corridas axiales al centro del diseño y el número de puntos centrales n_c .

Parámetros de los DCC.

Existen dos parámetros a especificar: α y n_c (número de puntos centrales).

- α : distancia a la cual se encuentran los puntos axiales o estrella a partir del centro del diseño.

Con el objetivo de que el diseño pueda proveer una buena predicción a lo largo y ancho (uniforme) de la región de interés (rotatibilidad), se selecciona alfa de la siguiente manera:

$$\alpha = (n_F)^{1/4}$$

- n_F : cantidad de corridas generadas por los factores (Hamada, 2000).
- n_c : Número de puntos centrales. Provee la posibilidad de estimar el error en la experimentación, así como de la curvatura central de la superficie de respuesta.

El número recomendado es generalmente de tres a cinco puntos centrales en los casos en que se tenga un diseño inicial $2K$. Se aumenta un punto central por cada factor más, $n_c= 3-5$ para 22, $n_c= 6$ para 23, etc.

2.2.6 Análisis de Varianza.

ANOVA determina si la variación entre el promedio de los niveles es mayor, de lo que razonablemente podría esperarse de la variación que ocurre dentro del nivel. Es una herramienta para comparar varias medias (para datos de respuestas continuos).

2.2.7 Prueba de Hipótesis.

La prueba de hipótesis (o prueba de significancia) es un procedimiento estándar para probar una aseveración acerca de una propiedad de una población.

Aceptar o Rechazar una Hipótesis:

Las Hipótesis pueden aceptarse o rechazarse mediante 3 métodos diferentes:

Método 1:

- 1) Si el Valor Calculado es $< \text{ó} =$ al Valor de la Tabla (Crítico), no pueden obtenerse conclusiones (no rechazar H_0).
- 2) Si el Valor Calculado es $>$ al Valor de la Tabla (Crítico), entonces existe una diferencia (rechazar H_0 , aceptar H_a).

Método 2:

- 1) Si el valor p es $> \text{ó} =$ a la α , no pueden obtenerse conclusiones (No rechazar H_0).
- 2) Si el valor p es $<$ a la α , entonces existe una diferencia (Rechazar H_0 , Aceptar H_a).

Método 3:

- 1) Si "0" cae dentro del Intervalo de Confianza alrededor de la diferencia de las dos medias, entonces no pueden obtenerse conclusiones (No rechazar H_0).
- 2) Si "0" cae fuera del Intervalo de Confianza alrededor de la diferencia de las dos medias, entonces existe una diferencia (Rechazar H_0 , Aceptar H_a).

2.2.8 Proceso de Moldeo por Inyección.

El proceso de transformación de plásticos por inyección se ha consolidado para una amplísima gama de productos. Las ventajas son evidentes (Bichler et al., 1997):

- Material Económico
- Escaso consumo de energía en la transformación por no necesitar altas temperaturas de proceso.
- Vía directa de la materia prima al producto terminado (proceso de un solo paso, no requiere tratamiento posterior).

En una producción económica y de alta calidad confluyen varios factores que influyen directamente en la consecución de un producto de óptima calidad. Estos factores tienen que ser seleccionados y manejados con acierto (Bichler et al., 1997).

El proceso de inyección es un proceso conformado de los materiales poliméricos termoplásticos que, en la actualidad, presenta una notable importancia económica y tecnológica, y cuyo estudio ha supuesto multitud de investigaciones relacionadas con la determinación de condiciones óptimas de proceso.

Las magnitudes que influyen directamente son (Bichler et al., 1997):

1. El factor humano: motivación, cualificación, flexibilidad, experiencia.
2. La máquina de inyección: ergonomía, capacidad, precisión, seguridad, dimensión, equipos de control.
3. El molde: diseño de la pieza y colada en función del material a transformar, estudio térmico, rigidez, mantenimiento.
4. El material: selección, pureza, secado, poca diferencia entre los lotes.
5. La periferia: atemperadores, canal caliente.
6. El medio ambiente: seguridad, influencia del ambiente.

El ser humano es el único factor con influencia capaz de aprender y reaccionar. Por ello tiene una importancia sobresaliente y necesita continuamente ayuda para afrontar la complejidad del proceso (Bichler et al., 1997).

Principios.

Limpieza y orden son imprescindibles, y además contribuyen a motivar a trabajar de forma sistemática. Tiene mucha importancia el observar continuamente los factores externos, como evitar que la puerta de la nave o maquina este abierta, o que haya ventiladores o calefactores cerca de la máquina (Bichler et al., 1997).

Todos los elementos de una instalación productiva han de revisarse periódicamente. Esto se refiere a la máquina, al molde y a los periféricos. En la inyección y por razones de seguridad, es necesario observar lo siguiente (Bichler et al., 1997):

1. Solo trabajar a molde abierto después de desconectar la bomba.
2. Intervenir en el canal caliente siempre provisto de guantes, gafas protectoras y barra de cobre.
3. Revisar periódicamente todos los dispositivos de seguridad de la máquina.

Durante todos estos trabajos y a la hora de preparar la máquina, el preparador debe dedicarse exclusivamente a la máquina y al proceso (Bichler et al., 1997).

2.2.9 Capacidad de Proceso - datos anteriores del “Fin Instrument” (con solo una especificación).

Existen procesos cuyas variables de salida tienen una sola especificación, ya sea que se trate de variables del tipo entre más grande mejor, donde lo que interesa es que sean mayores a cierto valor mínimo (especificación inferior); o de variables del tipo entre más pequeña mejor, donde lo que se quiere es que nunca excedan cierto valor máximo (especificación Superior) (Gutierrez & De la Vara, 2009).

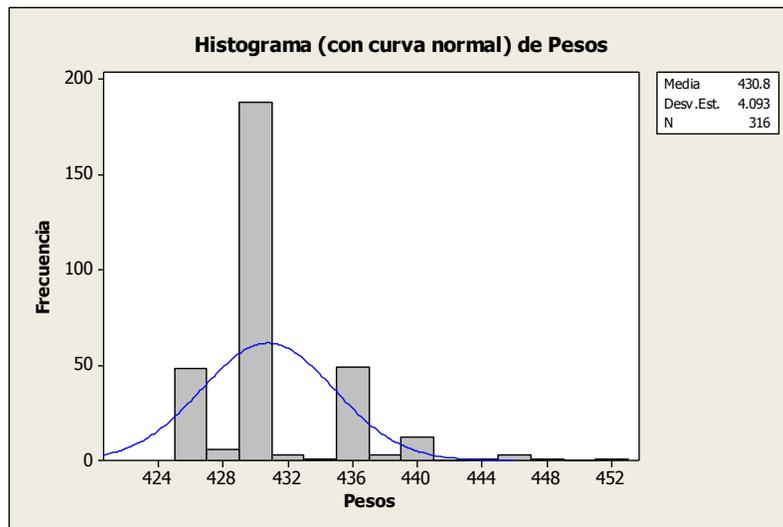
En casos como los anteriores, donde solo se tiene una especificación, se debe tener cuidado de no caer en la mala práctica de fijar de manera artificial una especificación inferior, ya que con frecuencia eso distorsiona el diagnostico que se realiza acerca del proceso. Lo adecuado es no imponerle más exigencias al proceso de las que sean realmente necesarias para la calidad (Gutierrez & De la Vara, 2009).

Revisando la información del área de calidad de la empresa, se encontró que el peso de la pieza “Fin Instrument” solo cuenta con información del límite inferior de especificación, es decir no tienen definido el límite superior de especificación. Por lo cual, los datos fueron analizados en el programa Minitab15:

Estadísticas descriptivas: Pesos

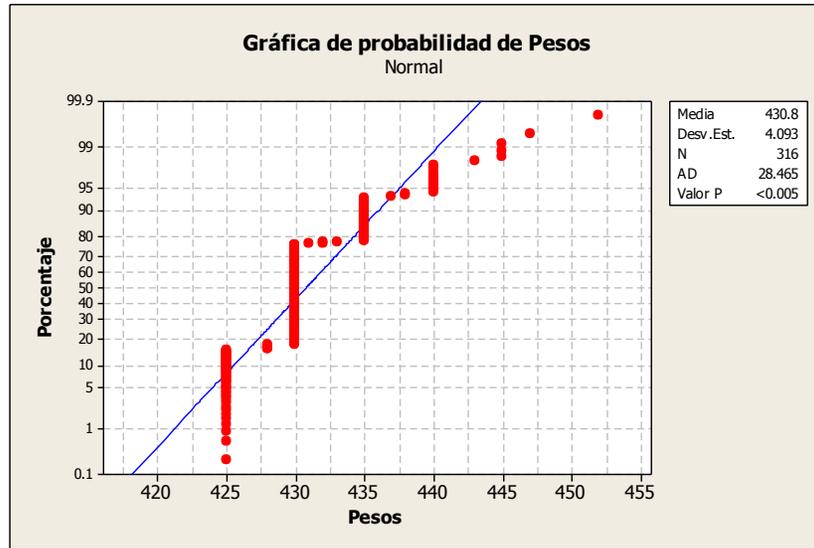
Variable	N	N*	Media	Media del Error estándar	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo
Pesos	316	0	430.76	0.230	4.09	16.75	0.95	425.00

Variable	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Pesos	430.00	430.00	430.00	452.00



Grafica 1. Histograma de Pesos anteriores del Proceso “Fin Instrument”.

Por medio de los registros de peso que realizan las promotoras de calidad diariamente, durante el inicio del proyecto se recopiló información del mes de enero, febrero y marzo de la pieza “Fin Instrument”, de donde fue seleccionada una muestra de datos de peso (N=316). Estos se analizaron en el software Minitab15 y se obtuvo como resultado una media de $\mu = 430.8$ con una desviación estándar de $\sigma = 4.093$ (Grafica 1).



Grafica 2. Probabilidad de Pesos anteriores del Proceso “Fin Instrument”.

La ‘grafica 2’ muestra que los datos no son normales, ya el valor “p” es menor a 0.05 y carecen de formar una línea aproximadamente recta. Por otro lado, se detectó que la báscula donde se pesaron las piezas tiene la característica (resolución) de pesar de 5gr en 5gr y por esta razón también ocasiono concentración de datos en ciertos rangos de peso.

Calculo de Capacidad del Proceso con datos anteriores del “Fin instrument”.

Con esta información se determinó una línea base sobre la capacidad que se tenía antes de aplicar el Diseño de Experimentos. Dado el tipo de variables, lo que se aplicó para este estudio fue el índice para la especificación inferior C_{pi} que evalúa la capacidad del proceso para cumplir con la especificación inferior. El índice de este proceso anterior está dado por:

$$C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3\sigma} = \frac{430.8 - 425}{3(4.093)} = 0.4642$$

El valor 0.4642 es un valor muy pequeño, por lo que el proceso es incapaz de cumplir con la especificación inferior de acuerdo con la ‘Tabla 1’. El porcentaje aproximado de productos que tendrían un peso menor a 425gr está entre 6.6807% y 11.5070% (Tabla 2), por lo que fue necesario hacer esfuerzos para mejorar este proceso.

TABLA 5.1 Valores del C_p y su interpretación.

VALOR DEL ÍNDICE C_p	CLASE O CATEGORÍA DEL PROCESO	DECISIÓN (SI EL PROCESO ESTÁ CENTRADO)
$C_p \geq 2$	Clase mundial	Se tiene calidad Seis Sigma.
$C_p > 1.33$	1	Adecuado.
$1 < C_p < 1.33$	2	Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto.
$0.67 < C_p < 1$	3	No adecuado para el trabajo. Es necesario un análisis del proceso. Requiere de modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria.
$C_p < 0.67$	4	No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias.

Tabla 1. Valores del C_p y su interpretación (a) (Gutierrez & De la Vara, 2009).

TABLA 5.2 Los índices C_p , C_{pi} y C_{ps} en términos de la cantidad de piezas malas; bajo normalidad y proceso centrado en el caso de doble especificación.

VALOR DEL ÍNDICE (CORTO PLAZO)	PROCESO CON DOBLE ESPECIFICACIÓN (ÍNDICE C_p)		CON REFERENCIA A UNA SOLA ESPECIFICACIÓN (C_{pi} , C_{ps} , C_{pk})	
	% FUERA DE LAS DOS ESPECIFICACIONES	PARTES POR MILLÓN FUERA (PPM)	% FUERA DE UNA ESPECIFICACIÓN	PARTES POR MILLÓN FUERA (PPM)
0.2	54.8506%	548 506.130	27.4253%	274 253.065
0.3	36.8120%	368 120.183	18.4060%	184 060.092
0.4	23.0139%	230 139.463	11.5070%	115 069.732
0.5	13.3614%	133 614.458	6.6807%	66 807.229
0.6	7.1861%	71 860.531	3.5930%	35 930.266
0.7	3.5729%	35 728.715	1.7864%	17 864.357
0.8	1.6395%	16 395.058	0.8198%	8 197.529
0.9	0.6934%	6 934.046	0.3467%	3 467.023

Tabla 2. Cantidad de piezas malas de acuerdo a los índices de C_p (a) (Gutierrez & De la Vara, 2009).

2.2.10 Máquina de fabricación de la pieza “Fin Instrument”

La máquina con la cual se fabrican las piezas “Fin Instrument” es de rodillos de la marca Chende Easy Master V de 560 toneladas (Figura 10).

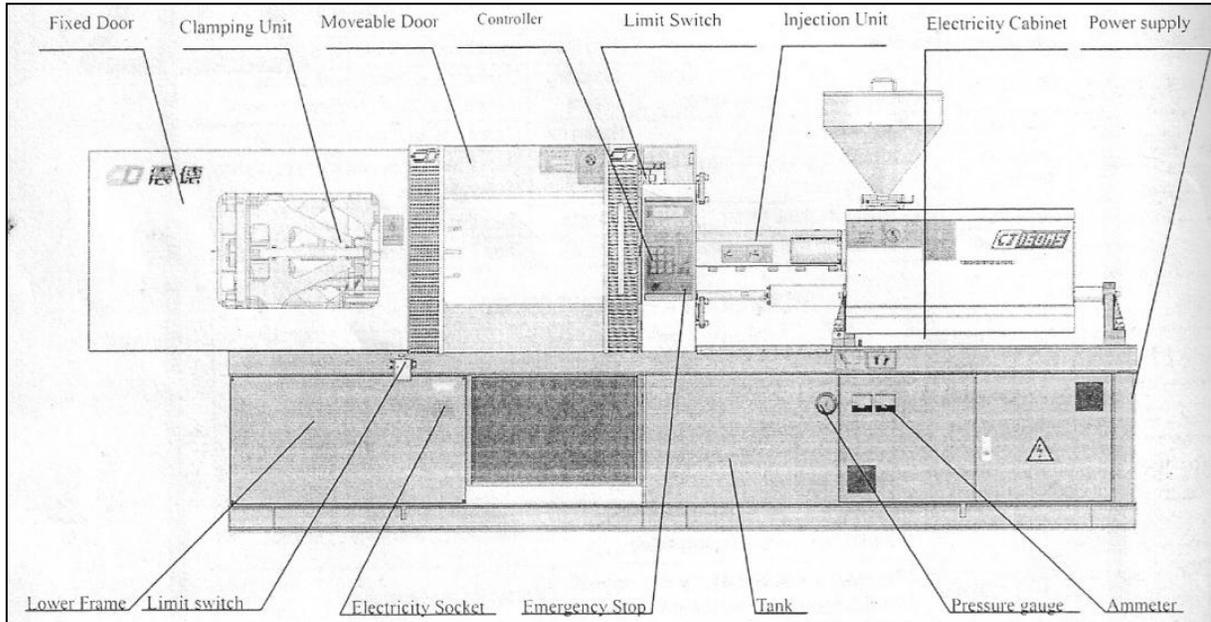


Figura 10. Estructura externa de la máquina EM560-(2) de moldeo por inyección.

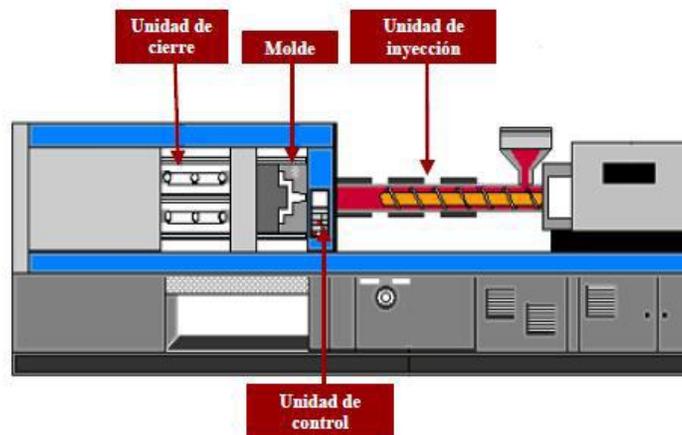


Figura 11. Partes principales de una máquina de inyección de plástico.

Se muestra la ficha de parámetros de inyección de la resina policarbonato (Tabla 3) y la ficha técnica de la máquina (Tabla 4), las cuales se obtuvieron del manual de la máquina Chende.

Description			PA6	Reinforced fiberglass PA66	PMMA	PC	Pe/PE
Parameter							
Processing features			Generally same for polyamide plastics	Likely to wear the machine	High melt viscosity Plunger injection molding machine mostly used.	High melt viscosity and vitrified temperature, short and thick running channel, strict process control required and screw-type injection molding machine mostly used	Good molding
Drying condition	Temperature/°C		—	85~100	80~90	110~120	120
	Time/h		—	8~24	2~8	>24	5~8
Temp. °C	Barrel	Back	200~210	230~240	160~180	220~240	230~240
		Middle	230~240	270~280		230~280	240~260
		Front	230~240	250~260	210~240	240~285	230~250
	Nozzle		200~210	250~260	180~200	240~250	220~230
	Mould		60~100	110~120	40~80	70~120	80~100
Injection pressure /MPa			80~100	80~130	80~130	70~150	80~120
Mold-ing cycle /s	Injection time	Holding pressure	15~50	20~60	20~60	20~90	20~80
		High pressure	0~4	2~5	0~5	0~5	0~5
		Cooling time	20~40	20~60	20~90	20~90	20~60
Rotational speed of screw /rMin ⁻¹			20~50	30	—	28~43	20~40
Heat treatment	Temperature/°C		—	100~120 (oil and water)	—	120~125	—
	Time/h		—	0.5~1	—	1~4	—
Remarks							

Tabla 3. Parámetros de Inyección para varias resinas de la máquina EM560-(2).

说明	DESCRIPTION	UNIT	EM560-V		
国际公认型号	International size rating	—	5600/3680		
射胶系统 INJECTION UNIT					
理论注射容积	Shot volume	cm ³	1767	2164	2544
实际注射量	Shot weight (PS)	g (克)	1625	1990	2340
		(oz) 盎司	57.3	70	82.5
螺丝直径	Screw diameter	mm	23.2	21	19.4
射胶压力	Injection pressure	MPa	209	170	145
螺丝长度直径比	Screw L:D ratio	—	23.2	21	19.4
螺丝行程	Screw stroke	mm			
螺丝转速	Screw speed(stepless)	r/min(max)	200		
锁模系统 CLAMPING UNIT					
锁模力	Clamping force	kN	5600		
开模行程	Opening stroke	mm	835		
模板尺寸	Platen size	mm×mm	1210x1210		
连接柱内距	Space between tie bars	mm×mm	855x855		
模板最大距离	Max. Daylight	mm	1685		
容模量(最薄-最厚)	Mold thickness (Min. Max.)	mm	330-850		
油压顶出行程	Hydraulic ejection stroke	mm	250		
油压顶出力	Hydraulic ejection force	kN	166		
动力/电热 POWER UNIT					
油压系统压力	Hydraulic system pressure	MPa	17.5		
油泵马达	Pump motor	kw	55		
电热量	Heating capacity	kw	30		
温度控制区数	Number of temp control zones	—	5		
其它 GENERAL					
油箱容量	Oil tank capacity	L	980		
机械外形尺寸(L×W×H)	Machine dimensions (L×W×H)	m×m×m	8.6x2.0x2.3		
机重	Machine weight	Ton	22		

Tabla 4. Ficha técnica de la máquina de moldeo CHENDE EASY MASTER V EM560-(2).

Como resumen de la información técnica de la máquina Chende Easy Master V, se muestran las siguientes características:

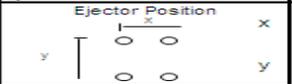
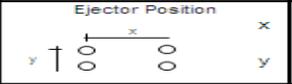
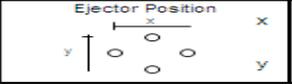
MODELO	EM 560 (2)
Año de Fabricación	2007
Clamping Force Tons	560
Clamping Force TM	504
Mold height Min. (mm)	330
Mold Height Max. (mm)	850
Clamp Stroke mm	835
Ejector Stroke mm	250
Distance Between bars Vmm	855
Distance between bars Hmm	855
Core Program and H. Valve	SI
Screw Diameter mm	83
Feed Rate mm	450
Injection Volumen (CM3)	2164
Injection Capacity gr (PS)	1990
Clamping Pressure Bar	-----
Machine Pressure Bar	178
Max. Injection Pressure Bar	1730
Location Ring (mm)	100
Nozzle Diameter (mm)	3.5
Ejector Central Position	SI
Ejector Position 	100mm 400mm
Ejector Position 	400mm 100mm
Ejector Position 	200mm 200mm

Tabla 5. Información Técnica resumida de la máquina de inyección EM-560(2).

Se recomienda utilizar los valores de estas fichas para el proceso de inyección de la pieza “Fin Instrument”.

2.2.11 Material de la Pieza “Fin Instrument”.

La pieza “Fin Instrument” es fabricada con una resina llamada Policarbonato, la cual puede ser considerada como un poliéster de ácido carbónico. Presentan una estructura amorfa y una baja tendencia a la cristalización (Figura 11).

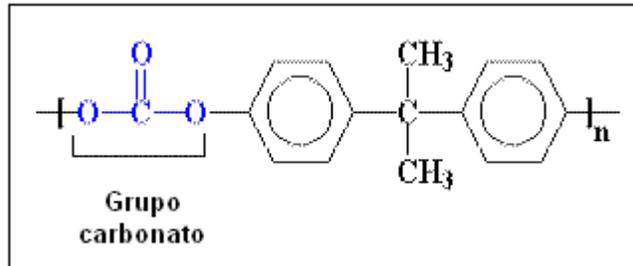


Figura 12. Formula condensada del Policarbonato.

Las características sobresalientes del Policarbonato son su tenacidad y resistencia al impacto, las cuales son superiores a las de la mayoría de los plásticos rígidos, transparentes y sin modificar, razón por la cual son considerados como plásticos de ingeniería (Consejo Técnico del Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000).

La naturaleza no cristalina del Policarbonato, tiene como consecuencia una baja contracción de moldeo que permite tolerancias dimensionales pequeñas. La estabilidad dimensional de piezas moldeadas es muy buena y presenta baja absorción de agua (Consejo Técnico del Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000).

El Policarbonato de uso general es auto-extinguible y existen también grados especiales considerados como no flamables. Al igual que otros plásticos, se puede modificar con fibras y cargas minerales que proporcionan gran variedad de grados. La resistencia química de este plástico no es particularmente buena. Los hidrocarburos, ésteres, cetonas, ácidos y bases fuertes pueden afectar severamente sus características físicas (Consejo Técnico del Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000).

Entre las numerosas aplicaciones del Policarbonato, muchas involucran la combinación de transparencia y tenacidad, como las ventanas de seguridad de lugares públicos, domos, mamparas, luminarias de la vía pública y faros automotrices, donde la seguridad y durabilidad de las piezas se deben a que son fabricadas con este material (Consejo Técnico del Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000).



Figura 13. Garrafones de Policarbonato.

Debido a que es un material atóxico, se han abierto sus aplicaciones al sector de envase de alimentos, como las botellas retornables para agua y leche, así como diversas aplicaciones de uso doméstico, por ejemplo, biberones y recipientes para uso de hornos de microondas. La resistencia al impacto y a la flama en la fabricación de carcasas de aparatos y herramientas de uso rudo, suele ser una propiedad esencial. Finalmente también se utiliza en artículos para uso médico, debido a que es un material que soporta diferentes tratamientos de esterilización (Consejo Técnico del Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000).

Pautas para la transformación del Policarbonato PC (Bichler et al., 1997).

1. Estructura: Amorfo
2. Densidad: $1,2 \text{ g/cm}^3$
3. Propiedades térmicas, ópticas, mecánicas: Duro, rígido, tenaz, hasta $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ resistente al impacto, resistente al calor, cristalino, fisiológicamente impecable, fácil de colorear, escasa absorción de agua y resistente a la intemperie.
4. Propiedades químicas: Resistente a Aceite, gasolina, ácidos débiles, alcohol.
5. No resistente a: ácidos fuertes, alcalinos, benceno.
6. Identificación del material: difícil de inflamar, se apaga después de eliminar la llama, arde con llama amarilla, produciendo hollín, carboniza, forma burbujas, carece de olor característico.

7. Temperaturas del cilindro:

- Brida 70-90 °C / *80 °C
- MH1 230-270 °C / *250 °C
- MH2 260-310 °C / *270 °C
- MH3 280-310 °C / *290 °C
- MH4 290-320 °C / *290 °C
- DH 300-310 °C / *290 °C

*Estas temperaturas son válidas para una ocupación de cilindro entre 35 y 65 % y piezas con una relación de flujo y espesor de pared entre 50:1 y 100:1.

8. Temperatura de la masa: 280-310°C

9. Temperatura de descenso: 200°C

10. Presión de inyección: se requiere presiones muy altas, ya que el material fluye muy mal (1300-1800 bars).

11. Presión remanente y tiempo de remanencia: aprox. El 40-60% de la presión de inyección necesaria. A menos remanencia, menos tensión de la pieza.

12. Contrapresión: 100-150 bars

13. Velocidad de inyección: en dependencia del flujo y del espesor. En piezas delgadas inyectar rápidamente. Si se requiere calidad superficial, escalar la velocidad de lenta a rápida.

14. Revolución de husillo: un máximo de 0.6 m/s velocidad circunferencial. Ajustar el tiempo de plastificación al de enfriamiento. Imprescindible alto par de giro.

15. Dosificación min. y máxima: se puede aprovechar como carrera de dosificación entre 0.5-3,5 D.

16. Cojín de masa: escaso, de 2 a 6mm, según volumen dosificado y diámetro del husillo.

17. Pre-secado: 3 horas a 120 °C. Propiedades mecánicas óptimas con un contenido de agua por debajo de 0.02%.

18. Reciclado: se puede mezclar hasta un 20% al material virgen. Resistencia al calor también con más recuperado, pero disminuyen las propiedades mecánicas.

19. Contracción: un 0.6-0.8 % aprox. (con fibra de vidrio 0.2-0.4%). Punto de inyección: el diámetro del punto de inyección debería ser al menos un 60-70% del espesor máximo. El mínimo tiene que ser 1,2mm (ángulo del cono 3°-5°, con superficie buena 2°) inyección en punto en piezas pequeñas con espesor regular.

2.2.12 Ficha técnica del material Policarbonato para pieza “Fin Instrument” (proveedor).

Proveedor del material: SABIC Innovative Plastics, Lexan* Resin EM1210, Americas: COMMERCIAL.

Automotive interiors. Excellent heat/impact resistance and outstanding property retention over wide temperature range/severe automotive conditions

TYPICAL PROPERTIES ¹	TYPICAL VALUE	Unit	Standard
MECHANICAL			
Tensile Stress, yld, Type I, 50 mm/min	580	kgf/cm ²	ASTM D 638
Tensile Strain, brk, Type I, 50 mm/min	110	%	ASTM D 638
Flexural Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	820	kgf/cm ²	ASTM D 790
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	20700	kgf/cm ²	ASTM D 790
IMPACT			
Izod Impact, notched, 23°C	78	cm-kgf/cm	ASTM D 256
Izod Impact, notched, -30°C	70	cm-kgf/cm	ASTM D 256
Izod Impact, notched, 23°C, 6.4mm	70	cm-kgf/cm	ASTM D 256
Instrumented Impact Energy @ peak, 23°C	622	cm-kgf	ASTM D 3763
Instrumented Impact Energy @ peak, -30	668	cm-kgf	ASTM D 3763
THERMAL			
HDT, 0.45 MPa, 6.4 mm, unannealed	135	°C	ASTM D 648
HDT, 1.82 MPa, 6.4 mm, unannealed	127	°C	ASTM D 648
CTE, -40°C to 95°C, flow	6.48E-05	1/°C	ASTM E 831
PHYSICAL			
Specific Gravity	1.19	-	ASTM D 792
Water Absorption, 24 hours	0.16	%	ASTM D 570
Mold Shrinkage, flow, 3.2 mm	0.5 - 0.7	%	SABIC Method
Melt Flow Rate, 300°C/1.2 gf	13	g/10 min	ASTM D 1238

Tabla 6. Ficha técnica del material para “Fin instrument”.

PROCESSING PARAMETERS	TYPICAL VALUE	Unit
Injection Molding		
Drying Temperature	120	°C
Drying Time	3 - 4	hrs
Drying Time (Cumulative)	48	hrs
Maximum Moisture Content	0.02	%
Melt Temperature	295 - 315	°C
Nozzle Temperature	290 - 310	°C
Front - Zone 3 Temperature	295 - 315	°C
Middle - Zone 2 Temperature	280 - 305	°C
Rear - Zone 1 Temperature	270 - 295	°C
Mold Temperature	70 - 95	°C
Back Pressure	0.3 - 0.7	MPa
Screw Speed	40 - 70	rpm
Shot to Cylinder Size	40 - 60	%
Vent Depth	0.025 - 0.076	mm

Tabla 7. Ficha técnica del material “Fin Instrument”.

3. METODOLOGÍA.

Con la finalidad de llevar a cabo un buen desarrollo en la aplicación del Diseño de Experimentos en este proyecto, se seccionó en ocho etapas las cuales se presentan a continuación:

3.1 Etapa1 - Observar y conocer el proceso de inyección de plástico.

A partir del inicio del proyecto y hasta su culminación, se observó el proceso de inyección de plástico de la pieza “Fin Instrument” (Figura 14) fabricada en la máquina EM-560(2) (Figura 15) para conocer y entender mejor cada etapa del proceso de inyección.

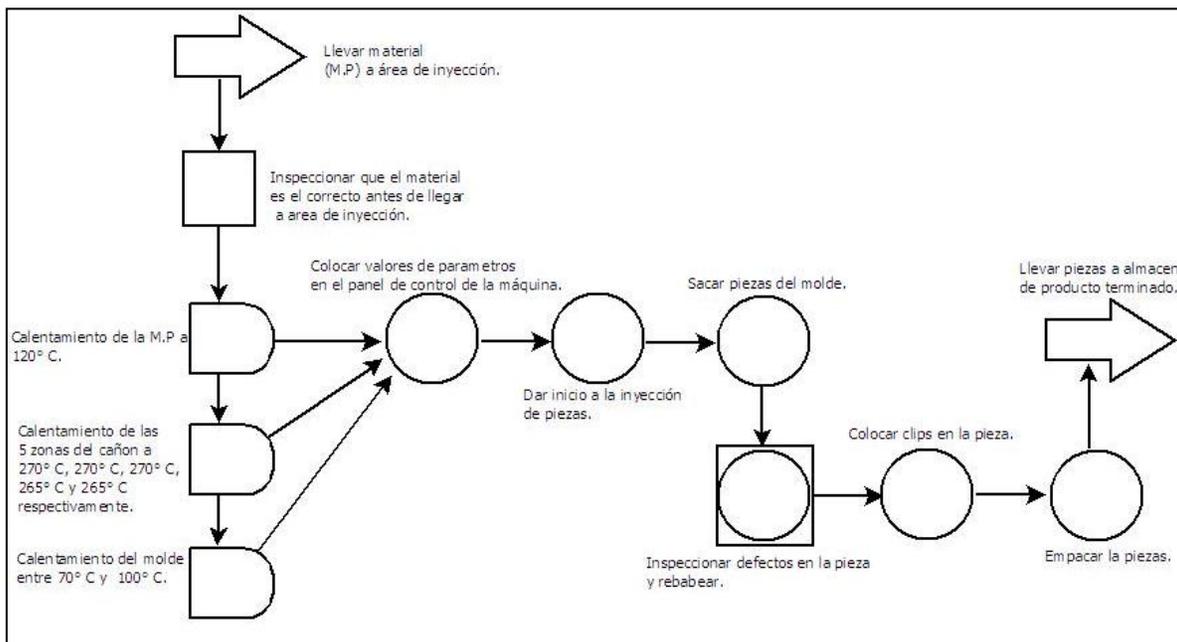


Figura 14. Diagrama de Flujo del proceso de inyección de plástico del “Fin Instrument”.

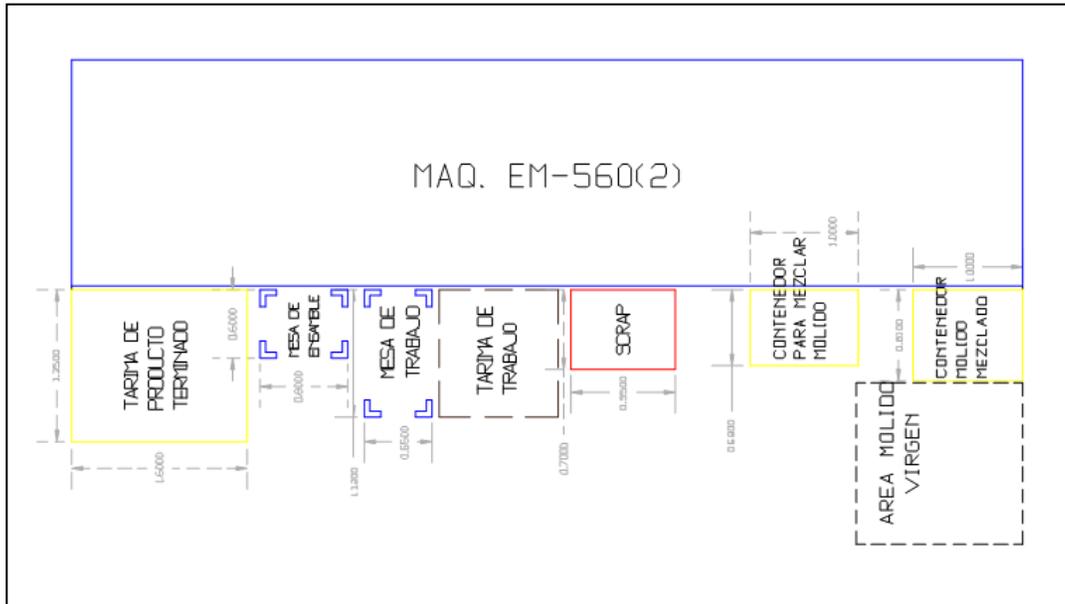


Figura 15. Layout del área de trabajo - máquina EM-560(2).

3.2 Etapa2 - Reunir información básica disponible de la empresa.

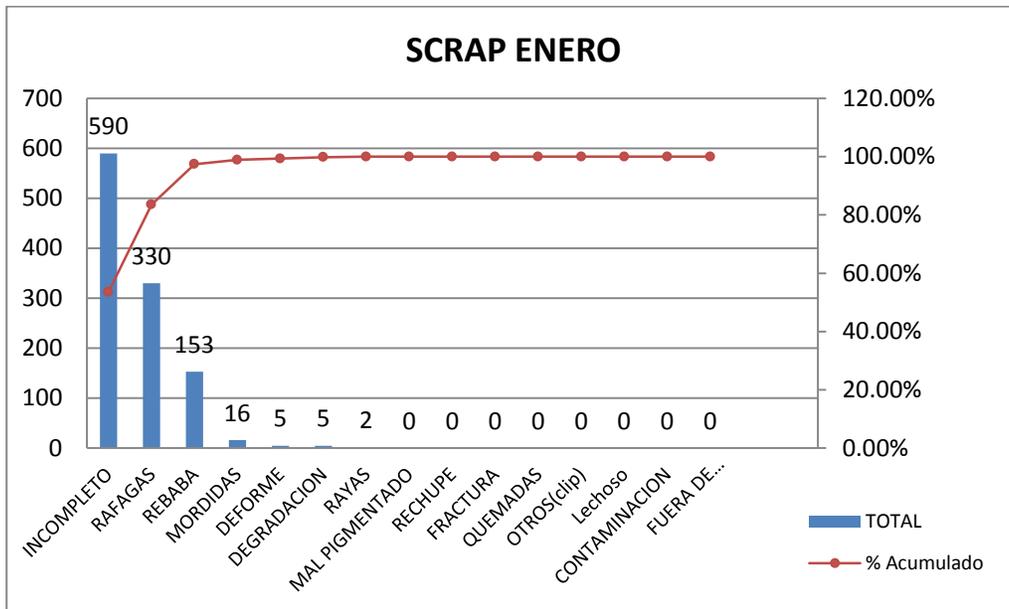
Se investigó y se obtuvo toda la información disponible de la base de datos del área de producción e ingeniería de la empresa; como reportes semanales de producción, reportes de desperdicios diarios y hojas de parámetros del proceso de inyección.

3.3 Etapa3 - Revisar y analizar la información.

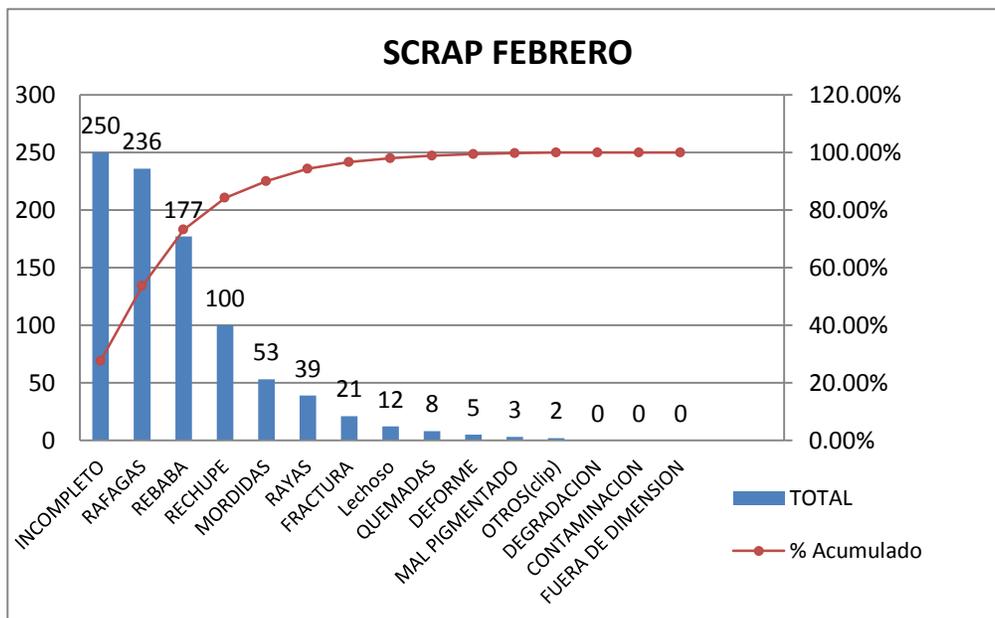
Se revisaron cada uno de los archivos y se analizó la información obtenida para identificar la cantidad de defectos que se presentan en la pieza “Fin Instrument”, los cuales han generado alto porcentaje de desperdicio durante el tiempo que lleva de fabricación la pieza en Industrias Camca.

Se elaboraron diagramas de Pareto³ de cada mes, para identificar y seleccionar el defecto que se presentó con más frecuencia en la pieza “Fin Instrument” (Grafica 3, 4 y 5).

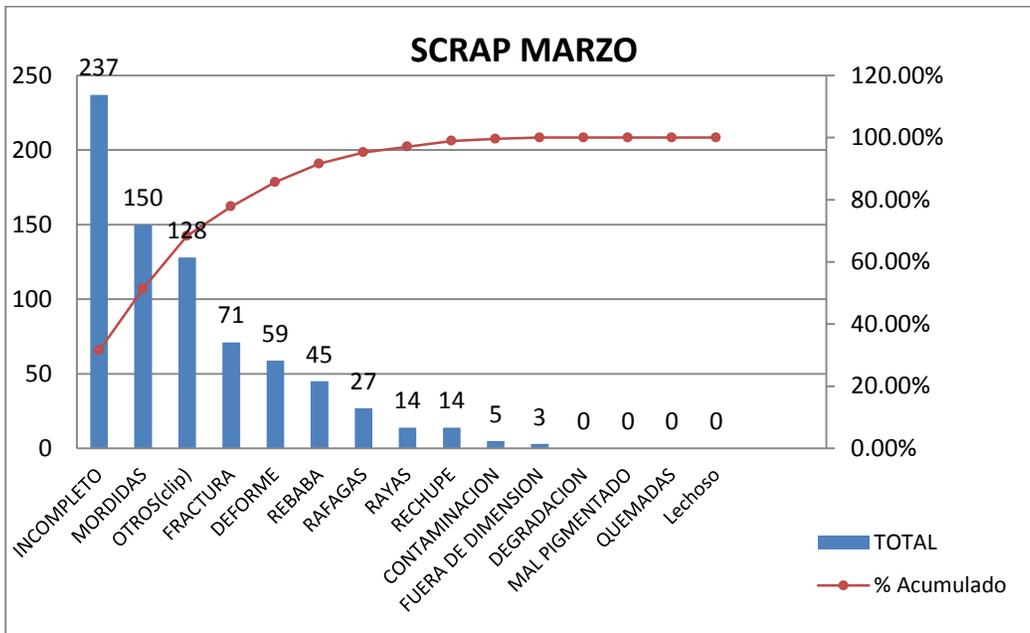
³ Principio de Pareto: separa los “pocos vitales” de los “muchos triviales”.



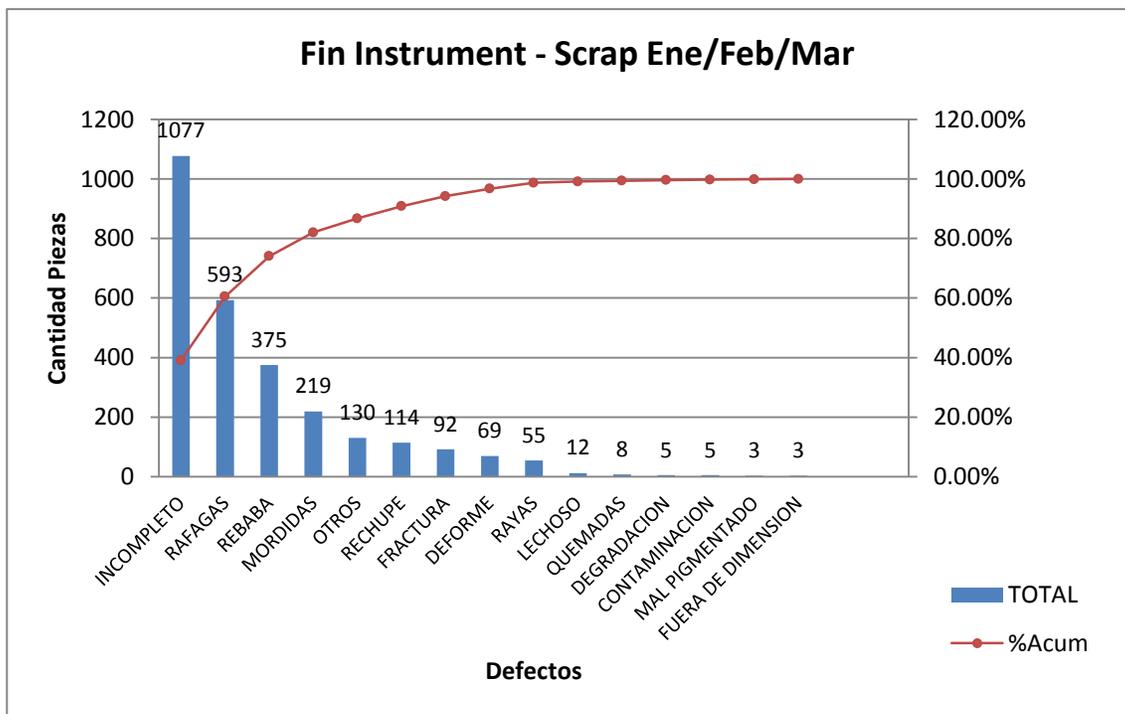
Grafica 3. Pareto - Defectos de Enero "Fin Instrument".



Grafica 4. Pareto - Defectos de Febrero "Fin Instrument".



Grafica 5. Pareto - Defectos de Marzo "Fin Instrument".



Grafica 6. Pareto General - Defectos de Enero, Febrero y Marzo del "Fin Instrument".

En la 'Grafica 6' se puede observar el defecto más frecuente presentado durante enero, febrero y marzo. Para fines de esta investigación de este proyecto se centró en analizar y realizar un Diseño de Experimentos para atacar el defecto "piezas incompletas".

3.4 Etapa4 - Aplicar Diseño de Experimentos.

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente en el proceso de inyección y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones.

Para aplicar el enfoque estadístico en el diseño de experimentos, es necesario que todos los que participan en el mismo tengan desde el inicio la idea clara de que es exactamente lo que va a estudiarse, como van a colectarse los datos, y al menos una comprensión cualitativa de la forma en que van analizarse estos datos (Montgomery D. C., 2004).

Se formó un equipo de trabajo (Figura 16) para realizar las actividades necesarias y por medio de esto lograr el objetivo del proyecto.

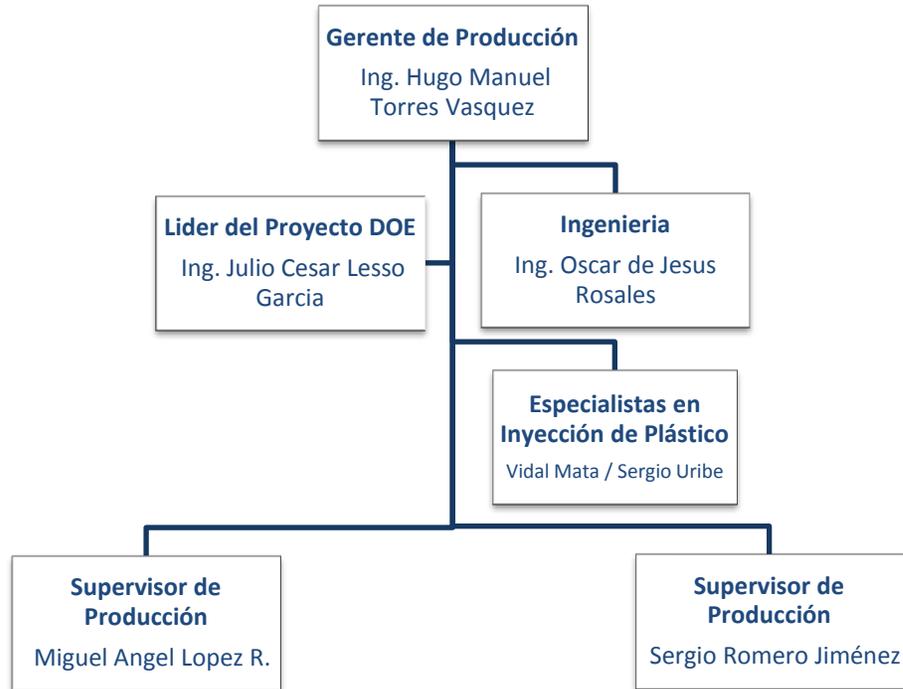


Figura 16. Equipo del Proyecto Diseño de Experimentos.

Para llevar a cabo el Diseño de Experimentos en este proyecto, se presenta una breve explicación de las pautas generales para Diseñar Experimentos (Tabla 8), las cuales se aplicaran para este estudio (Montgomery D. C., 2004):

- | | |
|--|------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> 1 Identificación y exposición del problema. 2 Elección de los factores, los niveles y los rangos.* 3 Selección de la variable de respuesta.* 4 Elección del diseño experimental 5 Realización del experimento 6 Análisis estadístico de los datos 7 Conclusiones y recomendaciones | } Planeación previa al experimento |
|--|------------------------------------|

* En la práctica, los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

Tabla 8. Pautas generales para diseñar un experimento (Montgomery D. C., 2004).

3.4.1 Identificación y enunciación del problema.

En este punto se define el objetivo del experimento, se determina qué es lo que se quiere lograr. Es importante solicitar aportaciones de todas las áreas y del personal involucrado, ya que por lo general conocen a fondo el proceso. Por esta razón, es recomendable el enfoque de equipo para diseñar experimentos. En la mayoría de los casos es conveniente hacer una lista de los problemas o las preguntas específicas que van a abordarse en el experimento (Montgomery D. C., 2004), ya que serán de mucha ayuda para poder tomar decisiones durante el desarrollo del proyecto, a continuación se muestran las preguntas:

- 1) ¿Cómo se llama la pieza que se analizará?: fin instrument.
- 2) ¿Cuándo dio inicio la fabricación de la pieza “Fin Instrument”?: a finales de diciembre del 2011.
- 3) ¿De qué tipo es el problema?: de calidad y costo.
- 4) ¿Cuál es el problema?: el alto índice de desperdicio de la pieza ocasionado por ciertos defectos.
- 5) ¿De quién es el molde?: es del cliente.
- 6) ¿De quién es la máquina?: de Industrias Camca.
- 7) ¿Cuánto tiempo podría durar el proyecto?: por lo menos un año.
- 8) ¿Cuáles son los defectos presentados en la pieza?: piezas Incompletas, Ráfagas, Deformación, Degradación, Mordidas, Rayas, Rebaba, Mal pigmentado, Rechupe, Fractura, Quemadas y Otros.

Como se menciona en el capítulo “Introducción”, el objetivo general es: Determinar los niveles óptimos de los factores significativos que causan el defecto de “piezas incompletas” en la pieza “Fin Instrument”, para reducir el número de rechazos internos mediante la aplicación del Diseño de Experimentos.

3.4.2 Elección de los factores y los niveles.

Decidir qué factores se estudiarán en el Diseño de Experimentos. Cuando se consideran los factores que pueden influir en el desempeño de un proceso o sistema, el experimentador suele descubrir que estos factores pueden clasificarse como *factores potenciales del diseño o bien como factores perturbadores*. Los factores potenciales del diseño son aquellos que el experimentador posiblemente

quiera hacer variar en el experimento. Es frecuente encontrar que hay muchos factores potenciales del diseño, por lo que es conveniente contar con alguna clasificación adicional de los mismos. Algunas clasificaciones útiles son *factores del diseño* son los que se seleccionan realmente para estudiarlos en el experimento, *factores que se mantiene constantes* son variables que pueden tener cierto efecto sobre la respuesta, pero que para los fines del experimento en curso no son de interés, por lo que se mantendrán fijos en un nivel específico y *factores a los que se permite variar*, muchas veces se trabajara con el supuesto de que los efectos de los factores que se mantienen constantes y de los factores que se permite variar son relativamente pequeños (Montgomery D. C., 2004). El desarrollo de un buen DOE debe centrarse de 5 a 8 factores a la vez y es necesario priorizar las variables.

Por otro lado, los factores perturbadores pueden tener efectos considerables que deben tomarse en cuenta, a pesar de que no haya interés en ellos en el contexto del experimento en curso. Los factores perturbadores suelen clasificarse como factores controlables, no controlables o de ruido. Un factor perturbador controlable es aquel cuyos niveles pueden ser ajustados por el experimentador. Si un factor perturbador no es controlable en el experimento, pero puede medirse, muchas veces puede usarse el procedimiento de análisis denominado análisis de covarianza para compensar este efecto. Cuando un factor que varía de manera natural y no controlable en el proceso puede controlarse para los fines de un experimento, con frecuencia se le llama factor de ruido (Montgomery D. C., 2004).

Una vez que se han seleccionado los factores del diseño, se deben elegir los rangos en los que se hará variar estos factores, así como los niveles específicos con los que se realizarán las corridas. También deberá pensarse como van a controlarse estos factores en los valores deseados y cómo van a medirse. Para ello se requiere del conocimiento del proceso. Este conocimiento del proceso suele ser una combinación de experiencia práctica y conocimientos teóricos. Es muy importante investigar todos los factores que pueden ser de importancia y no dejarse influir demasiado por la experiencia pasada, en particular

cuando uno se encuentra en las fases iniciales de la experimentación o cuando el proceso no está del todo maduro (Montgomery D. C., 2004).

Por lo general es mejor mantener reducido el número de niveles de los factores, dos niveles funcionan bastante bien en los estudios de tamizado de factores, así como también elegir la región de interés es importante, ya que el rango donde se permite variar los factores deberá ser amplio. Conforme se sepa más acerca de las variables que son importantes y de los niveles que producen los mejores resultados, la región de interés se hará por lo general más estrecha (Montgomery D. C., 2004).

Posteriormente para este proyecto se identificaron todos los factores (variables) involucrados en el proceso de inyección del “Fin instrument”. Para ello fue necesario reunirse con Ingenieros y técnicos especialistas del área de inyección de plástico (Figura 16). Por lo tanto se realizó una sesión de lluvia de ideas (brainstorming⁴) para identificar y clasificar todos los posibles factores potenciales que generaban el problema de “Piezas Incompletas”.

La lluvia de ideas se elaboró en el programa Minitab15, donde se realizó un diagrama Ishikawa⁵ (Figura 17), en el cual se identificaron las posibles causas. Esto nos condujo a un gran número de variables que intervienen y afectan al proceso de inyección de plástico de esta pieza.

En conjunto con este proyecto se implementó un Kaizen⁶ en el proceso de inyección del “Fin Instrument”, con otro equipo de trabajo conformado por el Gerente de Producción, técnicos de inyección, operadores, técnicos de mantenimiento, abastecedores e ingenieros. Lo cual fue de mucha ayuda porque se dio solución a otros problemas que existían en la máquina y el molde.

⁴**Brainstorming:** significa ‘lluvia de ideas’.

⁵**Diagrama Ishikawa:** también llamado diagrama de causa-efecto, se trata de un diagrama que por su estructura ha venido a llamarse también: diagrama de espina de pez, que consiste en una representación gráfica sencilla en la que puede verse de manera relacional una especie de espina central, que es una línea en el plano horizontal, representando el problema a analizar, que se escribe a su derecha.

⁶**Kaizen:** estrategia o metodología de calidad en la empresa y en el trabajo, tanto individual como colectivo. Significa "mejoramiento" en japonés y la traducción al castellano es "mejora continua" o "mejoramiento continuo".

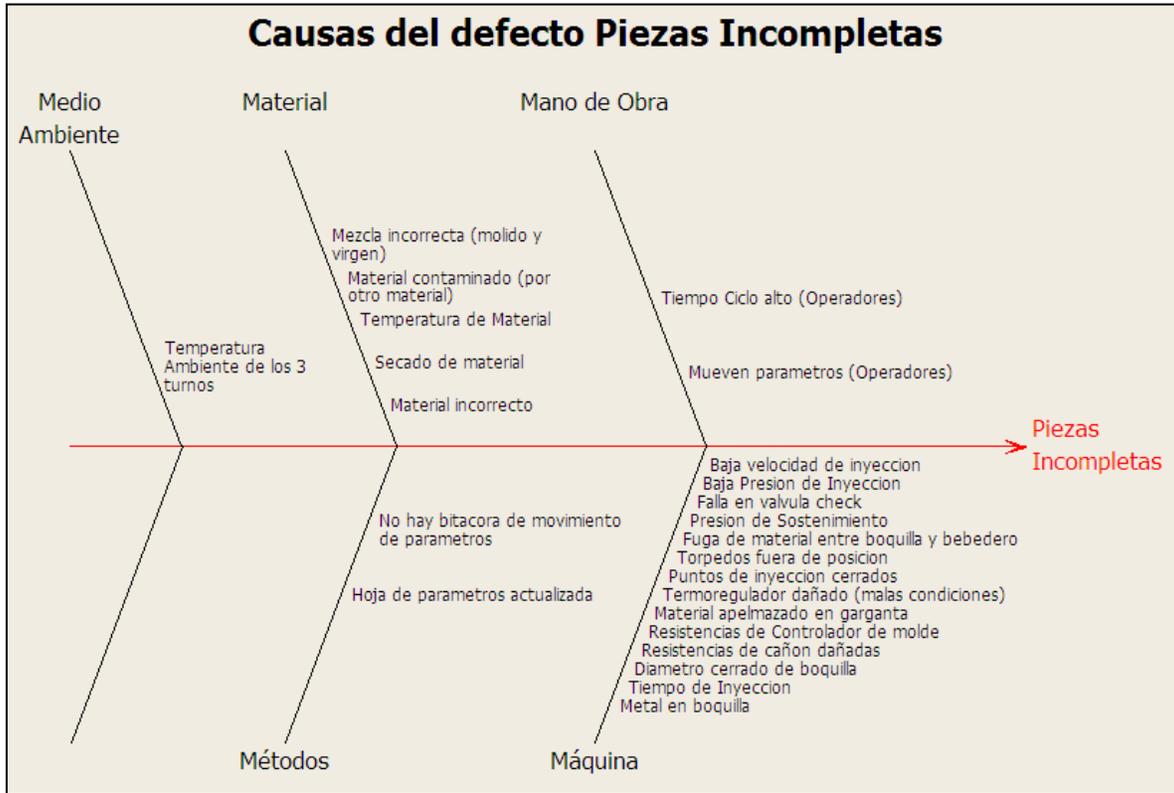


Figura 17. Ishikawa Piezas Incompletas (Causa-Efecto).

Después de identificar las posibles causas (variables o factores) que generan el defecto piezas incompletas, las causas se clasificaron como: críticas, no críticas, controlables, no controlables, constantes y los que se permiten variar (Tabla 9).

IDENTIFICACION DE FACTORES POTENCIALES - FIN INSTRUMENT / DEFECTO PIEZAS INCOMPLETAS		FACTORES					
		CRITICO	NO CRITICO	CONTROLABLE	NO CONTROLABLE	CONSTANTES	SE PERMITEN VARIAR
MANO DE OBRA							
1	Tiempo Ciclo alto (Operadores)		\	\			\
2	Mueven parámetros (Operadores)		\	\			\
MAQUINA Y EQUIPO							
1	Metal en boquilla	\		\			\
2	Tiempo de Inyección	\		\			\
3	Diámetro cerrado de boquilla		\	\		\	
4	Resistencias de cañón dañadas	\		\			\
5	Resistencias de Controlador de molde abiertas	\		\			\
6	Material apelmazado en garganta		\	\			\
7	Termorregulador dañado (malas condiciones)		\	\		\	
8	Puntos de inyección cerrados		\	\		\	
9	Torpedos fuera de posición		\	\		\	
10	Fuga de material entre boquilla y bebedero		\	\		\	
11	Presión de Sostenimiento	\		\		\	
12	Falla en válvula check		\	\		\	
13	Presión de Inyección	\		\			\
14	Velocidad de inyección	\		\			\
MATERIAL							
1	Mezcla incorrecta (molido y virgen)	\		\		\	
2	Material contaminado (por otro material)		\	\		\	
3	Temperatura del Material (masa)	\		\		\	
4	Secado de material		\	\		\	
5	Material incorrecto		\	\		\	
METODO							
1	Hoja de parámetros actualizada	\		\		\	
2	No hay bitácora de movimiento de parámetros		\	\			
MEDIO AMBIENTE							
1	Temperatura Ambiente de los 3 turnos		\		\		
Factores Seleccionados para el DOE							

Tabla 9. Identificación de factores potenciales - Defecto Piezas Incompletas.

Del conjunto de causas mostradas en la tabla anterior, considerando la experiencia del grupo de trabajo y el elevado costo de involucrar demasiadas variables, finalmente el equipo seleccionó nueve factores críticos para ser estudiados en este proyecto, los cuales fueron:

- **Tres presiones de Inyección:** es la presión requerida para vencer la resistencia al flujo del material desde el cilindro de plastificación hasta el molde.
- **Tres velocidades de Inyección:** el material plastificado es forzado a ingresar en la cavidad del molde. Esta etapa influye de manera importante en aspectos de calidad del producto como características mecánicas y apariencia.
- **Temperatura de la masa:** la cámara de plastificación de la máquina está provista de bandas calefactora que aportan cierto porcentaje de la energía que el plástico requiere para adquirir propiedades de flujo que le permitan ser inyectado e influyen en la viscosidad, densidad, degradación térmica, cristalinidad, orientación de moléculas, comportamiento mecánico y físico.
- **Presión de Sostenimiento:** también denominada presión posterior, secundaria, remanente, de empaque, generalmente es de menor magnitud a la de inyección y tiene como función mantener el material dentro del molde hasta su solidificación.
- **Tiempo de Inyección:** determina el efecto del enfriamiento de la masa plastificada en las paredes del molde. Cuando el tiempo de llenado aumenta, la capa de material solidificado es más gruesa y el canal por donde puede seguir ingresando el plástico, se vuelve más estrecho, incrementando la necesidad de presión.

A los factores seleccionados para entrar al diseño de experimentos les asignaron dos niveles; nivel bajo y nivel alto. Los cuales se obtuvieron por medio de la evaluación de desempeño del proceso (buscando la región donde el proceso se mantiene estable) de los valores de cada factor que son registrados en la ficha de fabricación (Tabla 10) cada que hay modificaciones en el proceso, es decir, cada que modifican el valor de un factor. La selección de los niveles se complementó tomando en cuenta la experiencia del equipo de trabajo para determinar los niveles de los parámetros seleccionados que entraron al diseño de experimentos.

Presion de Inyeccion (%)						T.inyeccion	
Registro	P1	P2	P3	P4	P5	Registro	%
1	90	88	88	88	88	1	3.4
2	90	86	86	85	85	2	3.5
3	87	86	86	85	85	3	3.5
4	87	86	86	85	85	4	3.6
5	88	88	88	85	85	5	5
6	98	95	95	85	88	6	5.5
7	95	93	90	90	89	7	6
8	98	98	95	85	85	8	5
9	98	95	94	94	93	9	6

Velocidad de Inyeccion (%)					Presion Sost.		
Registro	V1	V2	V3	V4	V5	Registro	%
1	50	50	50	53	53	1	20-25
2	53	50	50	53	53	2	24-20
3	48	50	50	53	53	3	20-20
4	48	50	50	53	53	4	20-20
5	65	60	60	58	58	5	20-25
6	65	58	58	53	53	6	25-25
7	60	65	65	65	60	7	30-30
8	56	60	60	60	60	8	25-20
9	60	55	50	40	40	9	25-25

Temperaturas Cañon (°C)						
Registro	Zona0	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4	Zona5
1	25%	265	265	265	260	260
2	25%	265	265	265	260	260
3	25%	265	265	260	260	260
4	25%	265	265	265	260	260
5	25%	265	265	265	268	268
6	30%	275	275	275	270	268
7	25%	276	275	275	270	268
8	25%	275	265	265	265	250
9	27%	265	270	270	268	260

Tabla 11. Registros de Parámetros (Datos).

Los factores o parámetros propuestos que entraron al diseño de experimentos se muestran a continuación con sus respectivos niveles:

No.	FACTORES QUE ENTRARAN AL DOE	Niveles Propuestos	
		Bajo	Alto
1	Presión de Inyección		
	P1	85%	95%
	P2	85%	95%
	P3	85%	95%
	P4	85%	
	P5	85%	
2	Velocidad de Inyección		
	V1	45%	55%
	V2	50%	60%
	V3	50%	60%
	V4	55%	
	V5	55%	
3	Temperaturas del Masa	250 °C	285 °C
4	Presión de Sostenimiento (empaquetado)	20%	30%
5	Tiempo de Inyección	3 s	6 s

factores que se mantendrán constantes (no entran al diseño)

Tabla 12. Factores seleccionados para el Diseño Factorial Fraccionado.

Es muy importante trabajar en equipo durante la planeación y la aplicación del experimento ya que la mayor parte del éxito se dará en torno a que tan bien se haya hecho la planeación previa del experimento (Montgomery D. C., 2004).

3.4.3 Selección de la variable de respuesta.

Para seleccionar la variable de respuesta, el experimentador deberá tener la certeza de que la variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar (σ) (o ambos) de la característica medida será la variable de respuesta. No son la excepción las respuestas múltiples. La eficiencia de los instrumentos de medición (o error de medición) también es un factor importante. Si la eficiencia de los instrumentos de medición es inadecuada, el experimentador solo detectara los efectos relativamente grandes de los factores o quizá sea necesario replicas adicionales. En algunas situaciones en que la eficiencia de los instrumentos de medición es pobre, el experimentador puede decidir medir varias veces cada unidad experimental y usar el promedio de las mediciones repetidas como respuesta observada (Montgomery D. C., 2004).

Experimentar con respuestas binarias (bueno/malo) es difícil (Bisgaard & Gersbakh, 2000), ya que se posee poca información. Por ello, en este proyecto se analizaron varias alternativas para encontrar la respuesta que se apague a la calidad de la pieza. Debido a esto fue seleccionado “el peso” de la pieza como variable de respuesta, ya que es una variable cuantitativa la cual tiene relación con el defecto que se analizó “piezas incompletas” (falta de material en la pieza).

Para realizar el pesaje de las piezas del diseño de experimentos, se definió que solo una persona pesaría las piezas (operador asignado). Así como también se determinó la forma de colocar la pieza sobre la báscula (la báscula cuenta con una resolución de 2kg) con el fin de evitar variación (errores) al momento de pesar cada una de las piezas necesarias.

3.4.4 Selección del diseño Experimental.

Elegir un tipo de Diseño de Experimentos depende del número de factores que se requiera estudiar, para poder obtener información con un número razonable de corridas. Al realizar el primer Diseño, se deben identificar todos los efectos principales y las interacciones que afecten dentro de las limitaciones de tiempo, materiales, costos y otros recursos.

Por la cantidad de factores (Tabla 12) y por la experiencia del asesor de tesis, se tomó la decisión de usar un Diseño Factorial Fraccionado para realizar un diseño de exploración y posteriormente aplicar una Superficie de Respuesta con un Diseño Central Compuesto (DCC) para encontrar los puntos óptimos de los factores significativos.

3.4.4.1 Construcción del Diseño Factorial Fraccionado.

Para aplicar el experimento, se pensó cuidadosamente acerca de la logística; como la gente necesaria para hacer el experimento y la disponibilidad de equipos para las pruebas. Esto con el fin de reducir el sesgo potencial de las variables que afectan al proceso de inyección, tales como el calentamiento de la máquina o cambios en las condiciones ambientales.

Elaboración del DFF en Minitab15.

El Diseño Factorial Fraccionado se elaboró en el Software Minitab15 (Tabla 13), donde se introdujeron los 9 factores o variables con sus respectivos niveles. En seguida se muestra el diseño con una réplica para visualizar las corridas del diseño. Al correr el experimento se recolectaron 10 repeticiones (10 pesos de piezas) por cada corrida.

Diseño Factorial Fraccionado

Factores: 9 Diseño Base: 9, 16 Resolución: III
 Corridas: 16 Réplicas: 1 Fracción: 1/32
 Bloques: 1 Puntos centrales (total): 0

Hoja de trabajo 1 ***												
↓	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
	OrdenCorrida	PuntoCentral	Bloques	Pres.Iny 1	Pres.Iny 2	Pres.Iny 3	Vel.Iny 1	Vel. Iny 2	Vel. Iny 3	Temp.Mat	Pres.Sost	Tiemp.Iny
1	1	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6
2	2	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3
3	3	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3
4	4	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6
5	5	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3
6	6	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6
7	7	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6
8	8	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3
9	9	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3
10	10	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6
11	11	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6
12	12	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3
13	13	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6
14	14	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3
15	15	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3
16	16	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6

Tabla 13. Corridas del Diseño Factorial Fraccionado.

Se definió un sistema de medición de los pesos antes de ejecutar el Diseño Factorial Fraccionado (Tabla 15).

Corridas del DFF

El objetivo de correr el Diseño Factorial Fraccionado es reducir el número de corridas identificando las variables significativas del diseño, así mismo podemos identificar algunas respuestas preliminares que nos muestra el experimento.

Previamente para realizar las corridas se introdujo en el panel de control de la máquina todos los parámetros (variables) que intervienen en el proceso de inyección, en conjunto con los factores seleccionados para realizar el DFF con sus respectivos niveles (Tabla 14).

TEMP		INJ		INJ		PLAST		MELT_D			
WR	SPEED	PRES	POS	SPEED	PRES	B.P	POS	SPEED	PRES	POS	
30	45-55 %	85-95 % TO	118 mm	ST 1 50 %	60 %	20 %	50 mm	DECOMP	45 %	45 %	5.0 mm
250-280 (°C)	50-60 %	85-95 % TO	60 mm	ST 2 50 %	60 %	20 %	130 mm	DLY		INJ TERM	2.3 mm
250-280 (°C)	50-60 %	85-95 % TO	10 mm	2 → 1 HOLD P				END FAST SLOW			
250-275 (°C)	55 %	85 % TO	6 mm	INJECT	SPEED	PRES	POS	OPENING	SPEED	PRES	POS
250-270 (°C)	55 %	85 % TO	4 mm	HOLD 1	2.5 %	20-30 %		SLOW	20 %	50 % TO	100 mm
250-270 (°C)		% TO		HOLD 2	2.0 %	20-30 %		FAST	40 %	60 % TO	500 mm
		% TO						BREAK	20 %	25 % TO	600 mm
FAST LOW PRE HI PRE		CORE		TIMER							
CLAMP.	SPEED	PRES	POS	SPEED	PRES	TIME	INJ. TIME	3s-6s	COOLING	35	
FAST CLA	50 %	50 % TO	150 mm	CORE IN	n/a %	n/a %	n/a s	CYC ALM		RECYCLE	2.5
L.P. CLA	20 %	30 % TO	110 mm	CORE OUT	n/a %	n/a %	n/a s	AIR EJECT 1		L.P. ALM	
H.P. LOCK	55 %	90 % TO	6.3 mm	CORE START BY	TIMER SET			PRE-PEC		PLAST DL	
				IN POS	CLAMP T	n/a	mm	CONTRAPRESION:	200	psi	
				OUT POS	OPEN TC	n/a	mm				
COLADA CALIENTE			EJECTOR	SPEED	PRES	POS	FUNCTION	BOOS T	POS SV	X	
Z1	265	Z3 265	Z5	EJ FOR	20 %	25 %	105 mm				
Z2	265	Z4 265	Z6	EJ BACK	20 %	25 %	100 mm				

Estos parámetros determinan la temperatura de masa, siendo Temperatura de masa de 250 °C =30%(boquilla) 250,250,250,250,250 (que son temperaturas en °C de las 6 zonas del cañon de la maquina) e igualmente para Temperatura de masa de 285 °C = 30%,280,280,275, 270,270
 Parámetros con nivel bajo y alto que serán usados para realizar el diseño de experimentos

Tabla 14. Ficha de Parámetros del Diseño Factorial Fraccionado.

Al establecer los parámetros por corrida y dar inicio a la fabricación de piezas, se tomó la decisión de producir inicialmente 10 piezas sin registrar su peso, con el motivo de establecer o ajustar el proceso por los cambios en los valores que se realizaron en los parámetros que entraron al diseño de experimentos. Una vez establecido el proceso se comenzó cada una de las corridas, donde se pesaron y se registraron las 10 piezas (de cada corrida).

Se elaboró un formato para el registro de la variable de respuesta “peso” de las piezas, lo cual permitió llevar un control al realizar cada corrida (Tabla 15). También fueron clasificadas como piezas completas o piezas incompletas.

FIN INSTRUMENT - DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO											
FACTORES											
Orden Corridas	Presion Iny 1	Presion Iny 2	Presion Iny 3	Vel. Iny 1	Vel. Iny 2	Vel. Iny 3	Temp. Material	Presion de Sost.	Tiempo.Iny		
1	85	85	85	45	50	50	250	20	6		
2	95	85	85	45	60	50	285	30	3		
3	85	95	85	45	60	60	250	30	3		
4	95	95	85	45	50	60	285	20	6		
5	85	85	95	45	60	60	285	20	3		
6	95	85	95	45	50	60	250	30	6		
7	85	95	95	45	50	50	285	30	6		
8	95	95	95	45	60	50	250	20	3		
9	85	85	85	55	50	60	285	30	3		
10	95	85	85	55	60	60	250	20	6		
11	85	95	85	55	60	50	285	20	6		
12	95	95	85	55	50	50	250	30	3		
13	85	85	95	55	60	50	250	30	6		
14	95	85	95	55	50	50	285	20	3		
15	85	95	95	55	50	60	250	20	3		
16	95	95	95	55	60	60	285	30	6		
Respuesta - Peso en gramos (Yijk)											
C / I	Orden Corridas	Pieza 1	Pieza 2	Pieza 3	Pieza 4	Pieza 5	Pieza 6	Pieza 7	Pieza 8	Pieza 9	Pieza 10
I	1	437	436	435	436	436	435	436	437	436	436
C	2	435	434	435	435	435	434	435	435	435	434
I	3	349	345	353	354	363	360	349	361	346	363
C	4	430	429	430	431	432	433	432	432	432	431
C	5	430	430	431	432	432	432	431	431	431	432
I	6	445	445	444	445	446	446	445	444	446	446
C	7	434	433	434	434	434	435	436	435	434	435
I	8	352	348	350	356	357	359	352	358	360	356
C	9	436	435	436	435	435	436	436	436	435	436
I	10	437	438	436	438	438	439	437	436	436	437
C	11	430	431	431	432	431	431	431	431	432	431
I	12	379	380	380	376	377	380	381	379	377	378
C	13	446	446	446	447	447	446	444	445	447	447
I	14	421	422	420	422	425	422	423	422	421	423
I	15	376	375	375	377	378	376	375	377	376	377
C	16	438	437	437	436	438	437	438	438	439	439

C= pieza completa I= pieza incompleta

Tabla 15. Datos de Corridas del Diseño Factorial Fraccionado.

La ‘Tabla 15’ muestra las corridas y los datos de pesos registrados. Los parámetros (factores) del diseño que se variaron para este experimento fueron: “presión de inyección 1, 2 y 3”, “velocidades de inyección 1, 2 y 3”, “presión de sostenimiento” y el “tiempo de inyección”. De acuerdo a esta tabla se identificaron soluciones preliminares (renglones en color rojo), las cuales cierran la banda de respuesta donde la pieza está dentro de las características de calidad deseada.

3.4.4.2 Construcción del Diseño Central Compuesto.

Elaboración del DCC en Minitab15.

Se eligieron cuatro factores significativos de los seis obtenidos en el DFF, para encontrar solución óptima a través de una Superficie de Respuesta por medio de un Diseño Central Compuesto (Tabla 16). Las variables o factores seleccionados con sus respectivos niveles que entraron al experimento DCC fueron:

- Tiempo de inyección (niveles: bajo 3s - alto 6s).
- Presión de inyección² (niveles: bajo 85% - alto 95%).
- Temperatura de la masa (niveles: bajo 250 °C - alto 285 °C).
- Presión de sostenimiento (niveles: bajo 20% - alto 30%).

El modelo de Superficie de Respuesta muestra lo siguiente:

Diseño Central Compuesto

Factores:	4	Réplicas:	1
Corridas base:	30	Total de corridas:	30
Bloques base:	2	Total de bloques:	2

Factorial de dos niveles: Factorial completo

Puntos del cubo:	16
Puntos centrales en el cubo:	4
Puntos axiales:	8
Puntos centrales en axial:	2

Alfa: 2

Hoja de trabajo 1 ***								
↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtType	Bloques	Presion.Iny2	Presion.Sost	Temp.Masa	Tiempo.Iny
1	1	1	1	1	85	20	250.0	3.0
2	2	2	1	1	95	20	250.0	3.0
3	3	3	1	1	85	30	250.0	3.0
4	4	4	1	1	95	30	250.0	3.0
5	5	5	1	1	85	20	285.0	3.0
6	6	6	1	1	95	20	285.0	3.0
7	7	7	1	1	85	30	285.0	3.0
8	8	8	1	1	95	30	285.0	3.0
9	9	9	1	1	85	20	250.0	6.0
10	10	10	1	1	95	20	250.0	6.0
11	11	11	1	1	85	30	250.0	6.0
12	12	12	1	1	95	30	250.0	6.0
13	13	13	1	1	85	20	285.0	6.0
14	14	14	1	1	95	20	285.0	6.0
15	15	15	1	1	85	30	285.0	6.0
16	16	16	1	1	95	30	285.0	6.0
17	17	17	0	1	90	25	267.5	4.5
18	18	18	0	1	90	25	267.5	4.5
19	19	19	0	1	90	25	267.5	4.5
20	20	20	0	1	90	25	267.5	4.5
21	21	21	-1	2	80	25	267.5	4.5
22	22	22	-1	2	100	25	267.5	4.5
23	23	23	-1	2	90	15	267.5	4.5
24	24	24	-1	2	90	35	267.5	4.5
25	25	25	-1	2	90	25	232.5	4.5
26	26	26	-1	2	90	25	302.5	4.5
27	27	27	-1	2	90	25	267.5	1.5
28	28	28	-1	2	90	25	267.5	7.5
29	29	29	0	2	90	25	267.5	4.5
30	30	30	0	2	90	25	267.5	4.5

Puntos del cubo

Puntos centrales en el cubo

Puntos axiales

Puntos centrales en axial

Tabla 16. Corridas del Diseño Central Compuesto.

Corridas del DCC.

La 'Tabla 17' muestra las treinta corridas realizadas en el DCC, donde se recolectaron 5 datos (repeticiones) de pesos por cada corrida, después de haber dejado establecer cada una de estas por los cambios de niveles realizados.

FIN INSTRUMENT - SUPERFICIE DE RESPUESTA (DOE2)										
Diseño Central Compuesto					Respuesta - Peso en gramos (Yijk)					
Corridas	Presion.Iny2	Presion.Sost	Temp.Masa	Tiempo.Iny	C / I	Pieza1	Pieza2	Pieza3	Pieza4	Pieza5
1	85	20	250	3	I	330	336	329	334	335
2	95	20	250	3	I	380	395	395	395	394
3	85	30	250	3	I	387	388	395	388	386
4	95	30	250	3	I	410	416	420	422	416
5	85	20	285	3	I	429	429	428	428	428
6	95	20	285	3	I	431	433	432	431	432
7	85	30	285	3	C	434	432	433	435	434
8	95	30	285	3	C	434	435	436	435	436
9	85	20	250	6	C	436	438	436	436	435
10	95	20	250	6	C	443	444	445	443	444
11	85	30	250	6	C	448	448	446	447	449
12	95	30	250	6	C	446	447	447	447	449
13	85	20	285	6	C	432	432	433	433	431
14	95	20	285	6	C	432	433	432	433	433
15	85	30	285	6	C	436	436	434	435	435
16	95	30	285	6	C	436	437	437	436	436
17	90	25	267.5	4.5	C	442	440	440	441	440
18	90	25	267.5	4.5	C	440	440	441	440	439
19	90	25	267.5	4.5	C	438	440	440	440	439
20	90	25	267.5	4.5	C	439	439	439	440	439
21	80	25	267.5	4.5	C	438	439	438	438	439
22	100	25	267.5	4.5	C	437	438	437	438	437
23	90	15	267.5	4.5	C	430	430	429	430	431
24	90	35	267.5	4.5	C	444	445	446	447	445
25	90	25	232.5	4.5	I	306	305	307	308	311
26	90	25	302.5	4.5	C	432	431	430	430	431
27	90	25	267.5	1.5	I	223	224	220	219	217
28	90	25	267.5	7.5	C	440	439	438	439	440
29	90	25	267.5	4.5	C	438	438	440	438	438
30	90	25	267.5	4.5	C	439	440	438	441	440

C= pieza completa I= pieza incompleta

Tabla 17. Datos de Corridas del Diseño Central Compuesto.

Se observó que en ciertas corridas de la 'Tabla 17' (renglones en rojo), en un rango de peso específico las piezas fueron buenas y por lo tanto se limitaron los rangos de proceso:

- Límite Inferior de Especificación (LIE) = 430gr.
- Límite Superior de Especificación (LSE) = 440gr.

3.5 Etapa6 - Presentación de resultados del Diseño de Experimentos en Industrias Camca.

Al llegar a la última etapa del proyecto y después de haber encontrado la solución del problema aplicando la metodología de diseño de experimentos, se realizó la presentación en el programa 'Powerpoint' para mostrar los resultados del proyecto al área de Producción, de Ingeniería y de Calidad de la empresa Industrias Camca S. A. de C. V.

3.6 Etapa7 - Elaboración de la documentación requerida.

Durante el desarrollo del proyecto se elaboraron formatos que fueron definidos para ser utilizados en el proceso de inyección de plástico de la pieza "Fin Instrument" como son: la actualización de la "Ficha de Fabricación", una bitácora para registrar el motivo de movimiento de parámetros, un check-list de arranque de máquina (ver anexo) y por último se elaboró un pequeño manual de los pasos necesarios para la implementación de Diseño de Experimentos. Todo esto para mantener el control del proceso de inyección de la pieza.

3.7 Etapa8 - Desarrollo de la tesis.

La Tesis se desarrolló en forma semanal con base a los tiempos de disponibilidad de la máquina y del molde, recopilando la información necesaria a través de la implementación del proyecto.

4. RESULTADOS Y DISCUSION.

4.1 Diseño Factorial Fraccionado.

Los datos de los “pesos” obtenidos en las corridas que se realizaron en el DFF, se introdujeron en el programa Minitab15, donde se colocaron las 10 repeticiones de cada corrida, quedando de la siguiente forma:

Diseño Factorial Fraccionado

Factores: 9 Diseño Base: 9, 16 Resolución: III
 Corridas: 160 Réplicas: 1 con 10 repeticiones Fracción: 1/32
 Bloques: 1 Puntos centrales (total): 0

OrdenEst	OrdenCorrida	PuntoCentral	Bloques	Pres.Iny1	Pres.Iny2	Pres.Iny3	Vel.Iny1	Vel.Iny2	Vel.Iny3	Temp.Mat	Pres.Sost	Tiempo.Iny	Yijk-Peso
1	1	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	437
2	2	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	435
3	3	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	349
4	4	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	430
5	5	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	430
6	6	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	445
7	7	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	434
8	8	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	352
9	9	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	436
10	10	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	437
11	11	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	430
12	12	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	379
13	13	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	446
14	14	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	421
15	15	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	376
16	16	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	438
17	17	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	436
18	18	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	434
19	19	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	345
20	20	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	429
21	21	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	430
22	22	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	445
23	23	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	433
24	24	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	348
25	25	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	435
26	26	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	438
27	27	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	431

Tabla 18. Corridas y pesos del DFF (parte1).

28	28	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	380
29	29	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	446
30	30	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	422
31	31	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	375
32	32	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	437
33	33	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	435
34	34	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	435
35	35	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	363
36	36	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	430
37	37	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	431
38	38	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	444
39	39	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	434
40	40	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	360
41	41	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	436
42	42	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	436
43	43	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	431
44	44	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	380
45	45	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	446
46	46	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	420
47	47	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	375
48	48	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	437
49	49	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	436
50	50	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	435
51	51	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	364
52	52	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	431
53	53	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	432
54	54	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	445

Tabla 19. Corridas y pesos del DFF (parte2).

55	55	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	434
56	56	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	356
57	57	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	435
58	58	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	438
59	59	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	432
60	60	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	376
61	61	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	447
62	62	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	422
63	63	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	377
64	64	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	436
65	65	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	436
66	66	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	435
67	67	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	363
68	68	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	432
69	69	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	432
70	70	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	446
71	71	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	434
72	72	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	357
73	73	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	435
74	74	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	438
75	75	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	431
76	76	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	377
77	77	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	447
78	78	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	425
79	79	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	378
80	80	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	438
81	81	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	435

Tabla 20. Corridas y pesos del DFF (parte3).

82	82	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	434
83	83	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	360
84	84	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	433
85	85	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	432
86	86	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	446
87	87	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	435
88	88	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	359
89	89	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	436
90	90	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	439
91	91	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	431
92	92	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	380
93	93	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	446
94	94	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	422
95	95	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	376
96	96	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	437
97	97	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	436
98	98	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	435
99	99	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	349
100	100	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	432
101	101	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	431
102	102	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	445
103	103	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	436
104	104	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	352
105	105	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	436
106	106	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	437
107	107	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	431
108	108	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	381

Tabla 21. Corridas y pesos del DFF (parte4).

109	109	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	444
110	110	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	423
111	111	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	375
112	112	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	438
113	113	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	437
114	114	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	435
115	115	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	361
116	116	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	432
117	117	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	431
118	118	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	444
119	119	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	435
120	120	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	358
121	121	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	436
122	122	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	436
123	123	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	431
124	124	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	379
125	125	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	445
126	126	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	422
127	127	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	377
128	128	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	438
129	129	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	436
130	130	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	435
131	131	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	346
132	132	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	432
133	133	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	431
134	134	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	446
135	135	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	434

Tabla 22. Corridas y pesos del DFF (parte5).

136	136	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	360
137	137	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	435
138	138	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	436
139	139	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	432
140	140	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	377
141	141	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	447
142	142	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	421
143	143	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	376
144	144	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	439
145	145	1	1	85	85	85	45	50	50	250	20	6	436
146	146	1	1	95	85	85	45	60	50	285	30	3	434
147	147	1	1	85	95	85	45	60	60	250	30	3	363
148	148	1	1	95	95	85	45	50	60	285	20	6	431
149	149	1	1	85	85	95	45	60	60	285	20	3	432
150	150	1	1	95	85	95	45	50	60	250	30	6	446
151	151	1	1	85	95	95	45	50	50	285	30	6	435
152	152	1	1	95	95	95	45	60	50	250	20	3	356
153	153	1	1	85	85	85	55	50	60	285	30	3	436
154	154	1	1	95	85	85	55	60	60	250	20	6	437
155	155	1	1	85	95	85	55	60	50	285	20	6	431
156	156	1	1	95	95	85	55	50	50	250	30	3	378
157	157	1	1	85	85	95	55	60	50	250	30	6	447
158	158	1	1	95	85	95	55	50	50	285	20	3	423
159	159	1	1	85	95	95	55	50	60	250	20	3	377
160	160	1	1	95	95	95	55	60	60	285	30	6	439

Tabla 23. Corridas y pesos del DFF (parte6).

Se analizaron los datos del experimento por medio de un ANOVA, el cual muestra lo siguiente:

Modelo lineal general: Yijk-Peso vs. Pres.Iny1, Pres.Iny2, ...

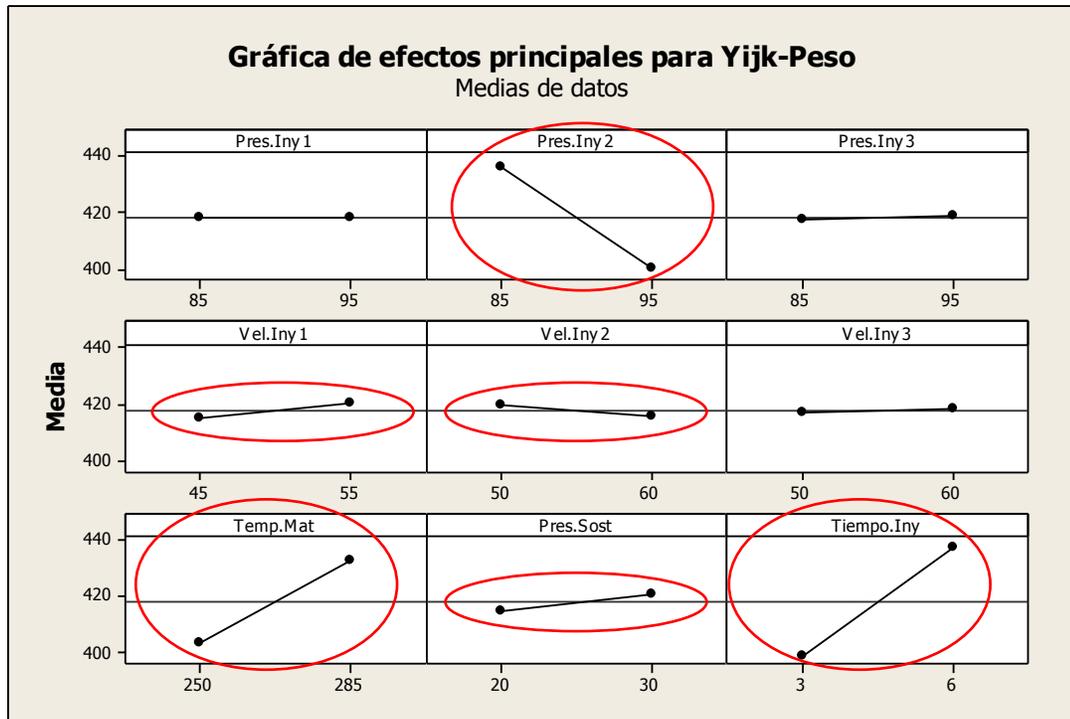
Factor	Tipo	Niveles	Valores
Pres.Iny1	fijo	2	85, 95
Pres.Iny2	fijo	2	85, 95
Pres.Iny3	fijo	2	85, 95
Vel.Iny1	fijo	2	45, 55
Vel.Iny2	fijo	2	50, 60
Vel.Iny3	fijo	2	50, 60
Temp.Mat	fijo	2	250, 285
Pres.Sost	fijo	2	20, 30
Tiempo.Iny	fijo	2	3, 6

Análisis de varianza para Yijk-Peso, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Pres.Iny1	1	7	7	7	0.21	0.650
Pres.Iny2	1	52454	52454	52454	1590.59	0.000 SIGNIFICATIVO (1)
Pres.Iny3	1	50	50	50	1.50	0.222
Vel.Iny1	1	1150	1150	1150	34.88	0.000 SIGNIFICATIVO (2)
Vel.Iny2	1	652	652	652	19.77	0.000 SIGNIFICATIVO (3)
Vel.Iny3	1	72	72	72	2.17	0.143
Temp.Mat	1	32919	32919	32919	998.22	0.000 SIGNIFICATIVO (4)
Pres.Sost	1	1375	1375	1375	41.69	0.000 SIGNIFICATIVO (5)
Tiempo.Iny	1	60567	60567	60567	1836.62	0.000 SIGNIFICATIVO (6)
Error	150	4947	4947	33		
Total	159	154192				

S = 5.74261 R-cuad. = 96.79% R-cuad. (ajustado) = 96.60%

El análisis de varianza del ANOVA muestra que 6 factores (en color rojo) tienen un p-value menor a $\alpha=0.05$, por esa razón son significativos ya que afectan a la respuesta “peso” de la pieza. Se generó la ‘Grafica 7’ para visualizar los efectos de cada factor y definir detalladamente los resultados, los cuales se muestran en esta tesis más adelante.



Grafica 7. Efectos principales para Yijk-Pesos.

La ‘Grafica 7’ presenta una serie de graficas de efectos principales, mostrando el efecto que genera el nivel bajo y alto de cada uno de los factores considerados para el DFF.

Con base al análisis anterior de los resultados del DFF, los factores significativos que afectan la respuesta “peso” de la pieza son:

1. Tiempo de Inyección.
2. Presión de Inyección2.
3. Temperatura del material o la masa.
4. Presión de Sostenimiento.
5. Velocidad de Inyección1.
6. Velocidad de Inyección2.

Se observa que al comparar las pendientes de las líneas de las gráficas de “Tiempo de Inyección”, “Presión de inyección2” y “Temperatura de material” parece no haber una gran diferencia entre sus efectos. Sin embargo, estos factores o variables son los que más impactan (generan mayor efecto) en la respuesta “peso” por la notable inclinación (pendiente) de la línea.

En cambio los factores “velocidades de inyección 1 y 2”, y la “presión de sostenimiento” generan un pequeño efecto sobre la respuesta. Por otro lado, los factores “velocidad de inyección3”, así como la “Presión de inyección 1 y 3” también muestran una pendiente pequeña lo cual significa que no generan efecto sobre la respuesta, es decir, son factores no significativos.

Por lo tanto, los factores que resultaron significativos pero con menor impacto en la respuesta se decidió mantenerlos en sus niveles medios: la “velocidad de inyección1 en 50%” y “la velocidad de inyección2 en 55%”.

Los factores que resultaron no significativos se estableció mantenerlos en: “presión de inyección1 en 90%”, “presión de inyección3 en 90%” y la “velocidad de inyección3 en 55%”.

4.2 Diseño Central Compuesto.

Los resultados de las observaciones de la respuesta “peso” se llevaron a cabo en el software Minitab15, donde se introdujeron las 5 repeticiones de cada corrida, quedando de la siguiente forma:

Diseño Central Compuesto

Factores:	4	Réplicas:	1 (5 repeticiones)
Corridas base:	30	Total de corridas:	150
Bloques base:	2	Total de bloques:	2

Factorial de dos niveles: Factorial completo

Puntos del cubo:	80
Puntos centrales en el cubo:	20
Puntos axiales:	40
Puntos centrales en axial:	10

Alfa: 2

OrdenEst	OrdenCorrida	PtType	Bloques	Presion.Iny2	Presion.Sost	Temp.Masa	Tiempo.Iny	Yijk-Peso
1	1	1	1	85	20	250.0	3.0	330
2	2	1	1	95	20	250.0	3.0	380
3	3	1	1	85	30	250.0	3.0	387
4	4	1	1	95	30	250.0	3.0	410
5	5	1	1	85	20	285.0	3.0	429
6	6	1	1	95	20	285.0	3.0	431
7	7	1	1	85	30	285.0	3.0	434
8	8	1	1	95	30	285.0	3.0	434
9	9	1	1	85	20	250.0	6.0	436
10	10	1	1	95	20	250.0	6.0	443
11	11	1	1	85	30	250.0	6.0	448
12	12	1	1	95	30	250.0	6.0	446
13	13	1	1	85	20	285.0	6.0	432
14	14	1	1	95	20	285.0	6.0	432
15	15	1	1	85	30	285.0	6.0	436
16	16	1	1	95	30	285.0	6.0	436
17	17	0	1	90	25	267.5	4.5	442
18	18	0	1	90	25	267.5	4.5	440
19	19	0	1	90	25	267.5	4.5	438
20	20	0	1	90	25	267.5	4.5	439
21	21	-1	2	80	25	267.5	4.5	438
22	22	-1	2	100	25	267.5	4.5	437
23	23	-1	2	90	15	267.5	4.5	430
24	24	-1	2	90	35	267.5	4.5	444
25	25	-1	2	90	25	232.5	4.5	306
26	26	-1	2	90	25	302.5	4.5	432
27	27	-1	2	90	25	267.5	1.5	223
28	28	-1	2	90	25	267.5	7.5	440

Tabla 24. Corridas y pesos del DCC (parte1).

29	29	0	2	90	25	267.5	4.5	438
30	30	0	2	90	25	267.5	4.5	439
31	31	1	1	85	20	250.0	3.0	336
32	32	1	1	95	20	250.0	3.0	395
33	33	1	1	85	30	250.0	3.0	388
34	34	1	1	95	30	250.0	3.0	416
35	35	1	1	85	20	285.0	3.0	429
36	36	1	1	95	20	285.0	3.0	433
37	37	1	1	85	30	285.0	3.0	432
38	38	1	1	95	30	285.0	3.0	435
39	39	1	1	85	20	250.0	6.0	438
40	40	1	1	95	20	250.0	6.0	444
41	41	1	1	85	30	250.0	6.0	448
42	42	1	1	95	30	250.0	6.0	447
43	43	1	1	85	20	285.0	6.0	432
44	44	1	1	95	20	285.0	6.0	433
45	45	1	1	85	30	285.0	6.0	436
46	46	1	1	95	30	285.0	6.0	437
47	47	0	1	90	25	267.5	4.5	440
48	48	0	1	90	25	267.5	4.5	440
49	49	0	1	90	25	267.5	4.5	440
50	50	0	1	90	25	267.5	4.5	439
51	51	-1	2	80	25	267.5	4.5	439
52	52	-1	2	100	25	267.5	4.5	438
53	53	-1	2	90	15	267.5	4.5	430
54	54	-1	2	90	35	267.5	4.5	445
55	55	-1	2	90	25	232.5	4.5	305
56	56	-1	2	90	25	302.5	4.5	431
57	57	-1	2	90	25	267.5	1.5	224
58	58	-1	2	90	25	267.5	7.5	439
59	59	0	2	90	25	267.5	4.5	438
60	60	0	2	90	25	267.5	4.5	440
61	61	1	1	85	20	250.0	3.0	329
62	62	1	1	95	20	250.0	3.0	395
63	63	1	1	85	30	250.0	3.0	395
64	64	1	1	95	30	250.0	3.0	420
65	65	1	1	85	20	285.0	3.0	428
66	66	1	1	95	20	285.0	3.0	432
67	67	1	1	85	30	285.0	3.0	433
68	68	1	1	95	30	285.0	3.0	436
69	69	1	1	85	20	250.0	6.0	436
70	70	1	1	95	20	250.0	6.0	445
71	71	1	1	85	30	250.0	6.0	446
72	72	1	1	95	30	250.0	6.0	447
73	73	1	1	85	20	285.0	6.0	433
74	74	1	1	95	20	285.0	6.0	432
75	75	1	1	85	30	285.0	6.0	434
76	76	1	1	95	30	285.0	6.0	437
77	77	0	1	90	25	267.5	4.5	440
78	78	0	1	90	25	267.5	4.5	441
79	79	0	1	90	25	267.5	4.5	440
80	80	0	1	90	25	267.5	4.5	439
81	81	-1	2	80	25	267.5	4.5	438
82	82	-1	2	100	25	267.5	4.5	437

Tabla 25. Corridas y pesos del DCC (parte2).

83	83	-1	2	90	15	267.5	4.5	429
84	84	-1	2	90	35	267.5	4.5	446
85	85	-1	2	90	25	232.5	4.5	307
86	86	-1	2	90	25	302.5	4.5	430
87	87	-1	2	90	25	267.5	1.5	220
88	88	-1	2	90	25	267.5	7.5	438
89	89	0	2	90	25	267.5	4.5	440
90	90	0	2	90	25	267.5	4.5	438
91	91	1	1	85	20	250.0	3.0	334
92	92	1	1	95	20	250.0	3.0	395
93	93	1	1	85	30	250.0	3.0	388
94	94	1	1	95	30	250.0	3.0	422
95	95	1	1	85	20	285.0	3.0	428
96	96	1	1	95	20	285.0	3.0	431
97	97	1	1	85	30	285.0	3.0	435
98	98	1	1	95	30	285.0	3.0	435
99	99	1	1	85	20	250.0	6.0	436
100	100	1	1	95	20	250.0	6.0	443
101	101	1	1	85	30	250.0	6.0	447
102	102	1	1	95	30	250.0	6.0	447
103	103	1	1	85	20	285.0	6.0	433
104	104	1	1	95	20	285.0	6.0	433
105	105	1	1	85	30	285.0	6.0	435
106	106	1	1	95	30	285.0	6.0	436
107	107	0	1	90	25	267.5	4.5	441
108	108	0	1	90	25	267.5	4.5	440
109	109	0	1	90	25	267.5	4.5	440
110	110	0	1	90	25	267.5	4.5	440
111	111	-1	2	80	25	267.5	4.5	438
112	112	-1	2	100	25	267.5	4.5	438
113	113	-1	2	90	15	267.5	4.5	430
114	114	-1	2	90	35	267.5	4.5	447
115	115	-1	2	90	25	232.5	4.5	308
116	116	-1	2	90	25	302.5	4.5	430
117	117	-1	2	90	25	267.5	1.5	219
118	118	-1	2	90	25	267.5	7.5	439
119	119	0	2	90	25	267.5	4.5	438
120	120	0	2	90	25	267.5	4.5	441
121	121	1	1	85	20	250.0	3.0	335
122	122	1	1	95	20	250.0	3.0	394
123	123	1	1	85	30	250.0	3.0	386
124	124	1	1	95	30	250.0	3.0	416
125	125	1	1	85	20	285.0	3.0	428
126	126	1	1	95	20	285.0	3.0	432
127	127	1	1	85	30	285.0	3.0	434
128	128	1	1	95	30	285.0	3.0	436
129	129	1	1	85	20	250.0	6.0	435
130	130	1	1	95	20	250.0	6.0	444
131	131	1	1	85	30	250.0	6.0	449
132	132	1	1	95	30	250.0	6.0	449
133	133	1	1	85	20	285.0	6.0	431
134	134	1	1	95	20	285.0	6.0	433
135	135	1	1	85	30	285.0	6.0	435
136	136	1	1	95	30	285.0	6.0	436

Tabla 26. Corridas y pesos del DCC (parte3).

137	137	0	1	90	25	267.5	4.5	440
138	138	0	1	90	25	267.5	4.5	439
139	139	0	1	90	25	267.5	4.5	439
140	140	0	1	90	25	267.5	4.5	439
141	141	-1	2	80	25	267.5	4.5	439
142	142	-1	2	100	25	267.5	4.5	437
143	143	-1	2	90	15	267.5	4.5	431
144	144	-1	2	90	35	267.5	4.5	445
145	145	-1	2	90	25	232.5	4.5	311
146	146	-1	2	90	25	302.5	4.5	431
147	147	-1	2	90	25	267.5	1.5	217
148	148	-1	2	90	25	267.5	7.5	440
149	149	0	2	90	25	267.5	4.5	438
150	150	0	2	90	25	267.5	4.5	440

Tabla 27. Corridas y pesos del DCC (parte4).

Al correr el Diseño Central Compuesto con los pesos anteriores (Tabla 24, 25, 26 y 27), se obtuvo el siguiente modelo de regresión:

Regresión de superficie de respuesta: Yijk-Peso vs. Presion.Iny2, Presion.Sost,

El análisis se hizo utilizando unidades sin codificar.

Coefficientes de regresión estimados de Yijk-Peso

Término	Coef	SE Coef	T	P
Constante	-4745.20	1235.72	-3.840	0.000
Presion.Iny2	-9.28	17.52	-0.530	0.597
Presion.Sost	19.18	13.69	1.401	0.164
Temp.Masa	32.75	4.70	6.964	0.000
Tiempo.Iny	336.75	44.86	7.507	0.000
Presion.Iny2*Presion.Iny2	0.18	0.08	2.156	0.033
Presion.Sost*Presion.Sost	0.18	0.08	2.133	0.035
Temp.Masa*Temp.Masa	-0.04	0.01	-6.071	0.000
Tiempo.Iny*Tiempo.Iny	-10.00	0.93	-10.759	0.000
Presion.Iny2*Presion.Sost	-0.10	0.11	-0.913	0.363
Presion.Iny2*Temp.Masa	-0.06	0.03	-2.000	0.047
Presion.Iny2*Tiempo.Iny	-0.69	0.36	-1.900	0.060
Presion.Sost*Temp.Masa	-0.06	0.03	-1.836	0.069
Presion.Sost*Tiempo.Iny	-0.57	0.36	-1.553	0.123
Temp.Masa*Tiempo.Iny	-0.56	0.10	-5.416	0.000

S = 24.4825

PRESS = 103698

R-cuad. = 76.81% R-cuad. (pred.) = 70.28% R-cuad. (ajustado) = 74.40%

La tabla de regresión muestra:

Regresión: comprueba si los términos en el modelo tienen algún efecto sobre la respuesta. El modelo de regresión es significativo ($p = 0$). Es decir, al menos uno de los términos en la ecuación de regresión tiene un impacto significativo sobre la respuesta media. La regresión se descompone en los diferentes órdenes⁷ de los términos del modelo - lineal, cuadrático e interacción:

La ecuación de regresión para este modelo es:

- **Peso (y_{ijk}) =**
$$\begin{aligned} & -4745.209.28 (\text{Presion.Iny2}) + 19.18 (\text{Presion.Sost}) + 32.75 (\text{Temp.Masa}) + \\ & 336.75 (\text{Tiempo.Iny}) + 0.18 (\text{Presion.Iny2})^2 + 0.18 (\text{Presion.Sost})^2 - \\ & 0.04 (\text{Temp.Masa})^2 - 10.00 (\text{Tiempo.Iny})^2 - \\ & 0.10 (\text{Presion.Iny2} * \text{Presion.Sost}) - 0.06 (\text{Presion.Iny2} * \text{Temp.Masa}) - \\ & 0.69 (\text{Presion.Iny2} * \text{Tiempo.Iny}) - 0.06 (\text{Presion.Sost} * \text{Temp.Masa}) - \\ & 0.57 (\text{Presion.Sost} * \text{Tiempo.Iny}) - 0.56 (\text{Temp.Masa} * \text{Tiempo.Iny}) \end{aligned}$$

El 76.81% de la variación en la respuesta “peso” es explicada por el modelo, el R^2 pronosticado es 70.28% y el R^2 ajustado es 74.40%.

⁷ **Orden:** El orden de un término en un modelo de regresión corresponde al grado exponencial de ese término. De esta manera, un término lineal (x) es un término de primer orden; un término cuadrático (x^2) es un término de segundo orden; y una interacción de dos factores (x_1x_2) también es un término de segundo orden. En experimentos de superficie de respuesta, no es posible estimar términos de orden tres o superior.

4.2.1 Optimización de Respuesta para el proceso de inyección “Fin Instrument”.

Los valores que se eligieron como meta en cuanto al peso de la pieza son: límite inferior de 430gr, objetivo de 435gr, límite superior de 440gr y la ponderación (Figura 18) definen la función de deseabilidad⁸ para cada respuesta individual.

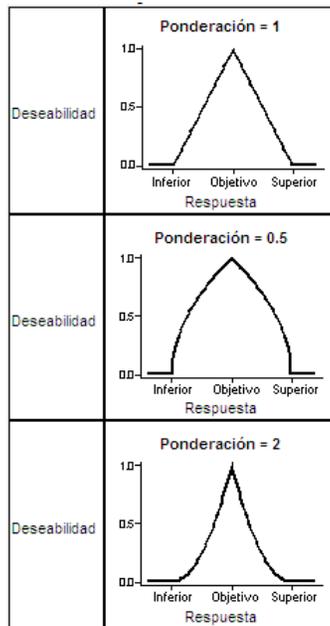


Figura 18. Ponderaciones que afectan la forma de la función de deseabilidad.

Se introdujeron los límites de especificación definidos anteriormente en el software Minitab15 y los resultados fueron los siguientes:

Optimización de respuesta.

Parámetros

	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importar
Yijk-Peso	Objetivo	430	435	440	1	1

Punto de inicio

Presion.Iny2	=	85
Presion.Sost	=	20
Temp.Masa	=	270
Tiempo.Iny	=	5

⁸ La función de deseabilidad: convierte cada escala de respuestas en una escala de deseabilidad de cero a uno. Los valores más deseables de la respuesta tienen deseabilidad uno. Los valores menos deseables tienen deseabilidad cero.

Solución local

Presion.Iny2 = 85.0476
Presion.Sost = 20.0255
Temp.Masa = 269.948
Tiempo.Iny = 4.32443

Respuestas pronosticadas

Yijk-Peso = 435 , conveniencia = 1.000000

Conveniencia compuesta = 1.000000

Solución global

Presion.Iny2 = 85.0476
Presion.Sost = 20.0255
Temp.Masa = 269.948
Tiempo.Iny = 4.32443

La meta para “peso” es obtener un valor que se ubique en o cerca del valor Objetivo de 435gr. Valores menores que 430gr o mayores que 440gr son inaceptables. Observe que el límite inferior (430gr) está igual de cerca del objetivo que el límite superior (440gr). Por lo tanto, la relación propuesta; “a mayor peso de la pieza causa más rebaba”, siendo así, es más deseable desviarse por debajo del objetivo que por encima.

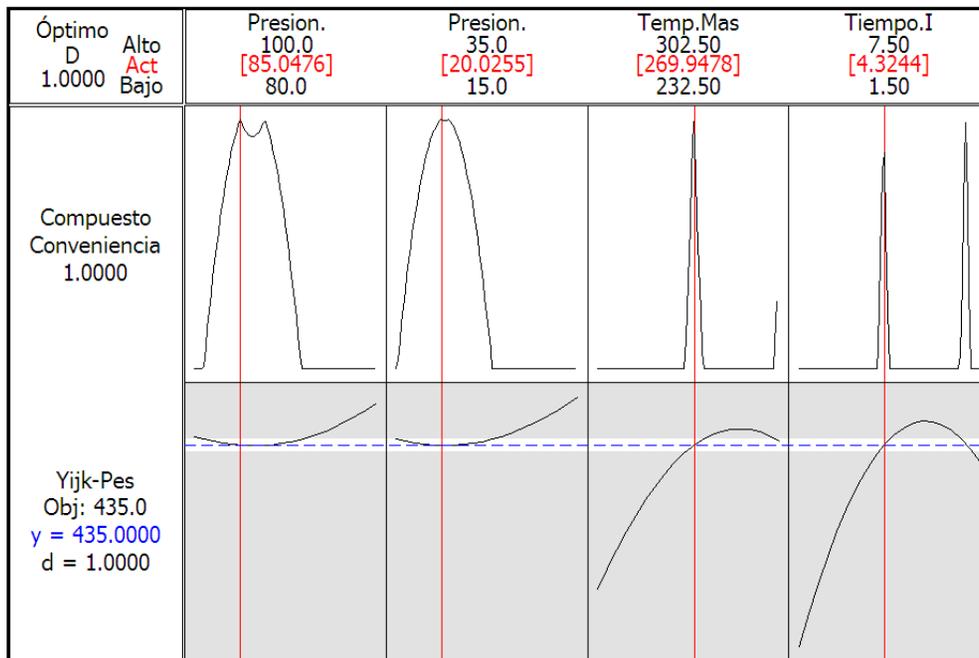
El propósito de este estudio es mantener el peso en el rango aceptable (de 430gr a 440gr) para evitar ‘piezas incompletas’ y al mismo tiempo ‘rebaba’.

Solución global: es la mejor combinación de valores de configuración de los factores para alcanzar las respuestas deseadas. En este estudio la mejor combinación global es; Presion.Iny2 = 85.0476 %, Presion.Sost = 20.0255 %, Temp.Masa = 269.948 °C, Tiempo.Iny = 4.32443 s.

Al respecto del proceso de moldeo por inyección de plástico de la pieza “Fin Instrument”, para evitar que la pieza se produzca incompleta, sin mucha rebaba y cumpla las características de calidad; se establecieron los factores óptimos de la siguiente forma:

- ✓ Establecer la Presión de inyeccion2 en 85%
- ✓ Establecer la presión de sostenimiento en 20%
- ✓ Establecer la temperatura de masa en 270 °C
- ✓ Establecer el tiempo de inyección en 4.3s

Las respuestas pronosticadas indican que, de acuerdo con los modelos ajustados, las piezas producidas utilizando la configuración de factores (Grafica 8) mostrarán, en promedio, la propiedad de peso de 435 gr. Esta característica de calidad está dentro de los límites aceptables. La importancia del peso en la ‘grafica 7’ es estar en la deseabilidad de “1”.

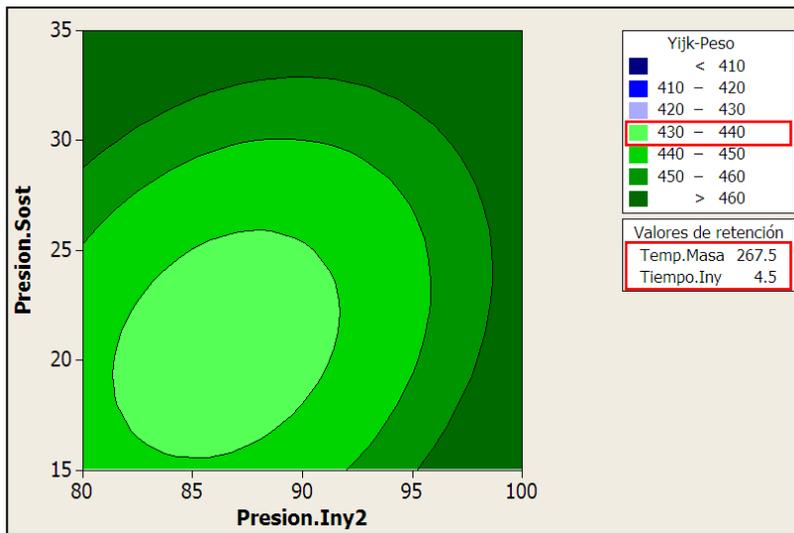


Grafica 8. Configuración de factores que optimiza la respuesta “peso”.

4.2.2 Graficas de Contorno y Superficie de “Yijk-Peso” vs cada uno de los pares de factores.

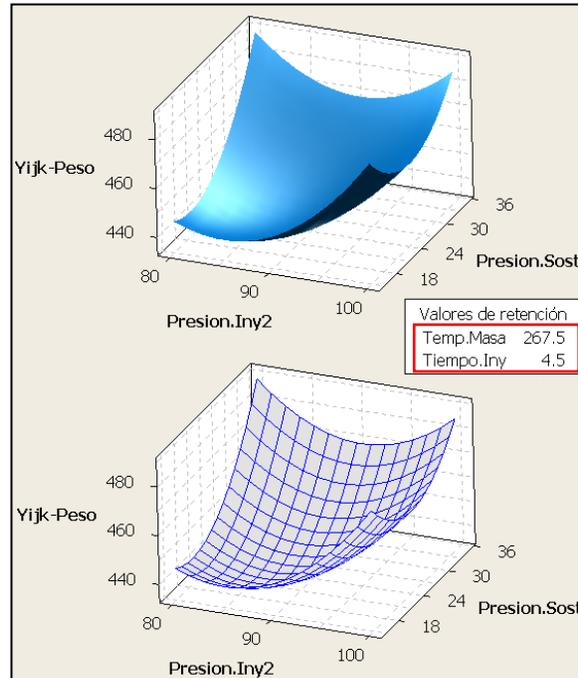
Con la gráfica de contorno se exploró la relación entre tres variables. Generalmente, hay dos predictores (factores) y una variable de respuesta. Las gráficas de contorno son útiles para establecer valores de respuesta y condiciones operativas deseables. Podemos buscar:

- Combinaciones de X y Y que producen mínimos o máximos.
- "Crestas" de valores altos o "valles" de valores bajos.



Grafica 9. Contorno de Yijk-Peso vs. Presión.Sost, Presión.Iny2.

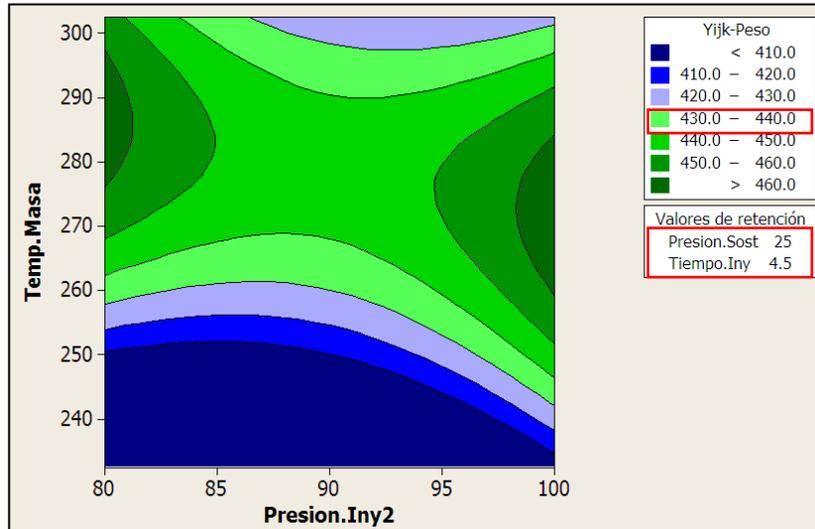
Para los datos de peso de la 'gráfica 9' de contorno, muestra que los valores deseados de pesos se encuentran en el área o región de 430gr a 440gr (color verde claro) manteniendo constante la temperatura de masa a 267.5 °C aprox. y un tiempo de inyección a 4.5s.



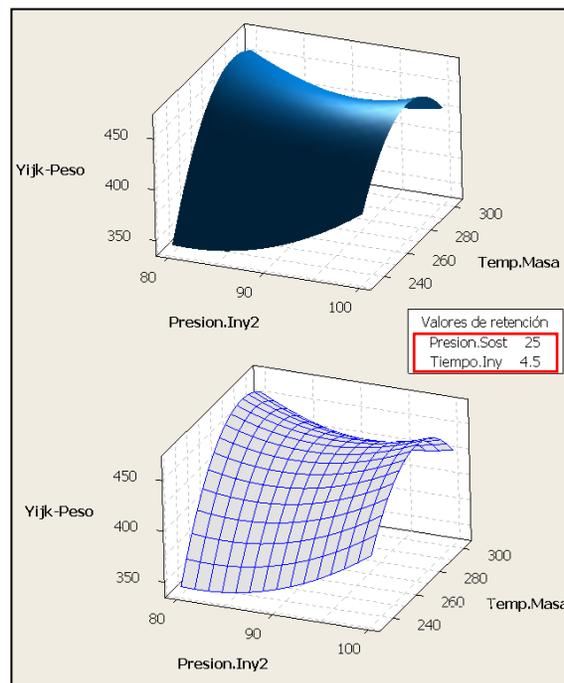
Grafica 10. Superficie de respuesta Yijk-Peso vs. Presión.Sost, Presión.Iny2.

Las gráficas de superficie de respuesta son útiles para establecer valores de respuesta y condiciones operativas deseables. La ‘gráfica 10’ muestra cómo la variable de respuesta “peso” se relaciona con los factores experimentales: “Presión.Iny2” y “Presión.Sost” basándose en una ecuación de modelo. La superficie de respuesta ayuda a visualizar cómo la respuesta en este caso el “peso” reacciona a cambios en los factores experimentales. Los contornos de esta grafica corresponden a una superficie de respuesta con un mínimo.

Debido a que la gráfica de superficie sólo muestra dos factores a la vez, cualquier factor extra se mantiene en un nivel constante. Por consiguiente, las gráficas de superficie sólo son válidas para los niveles fijos de los factores extra. Si se cambian los niveles fijos, la superficie de respuesta también cambia, algunas veces drásticamente.



Grafica 11. Contorno de Yijk-Peso vs. Temp.Masa, Presión.Iny2.

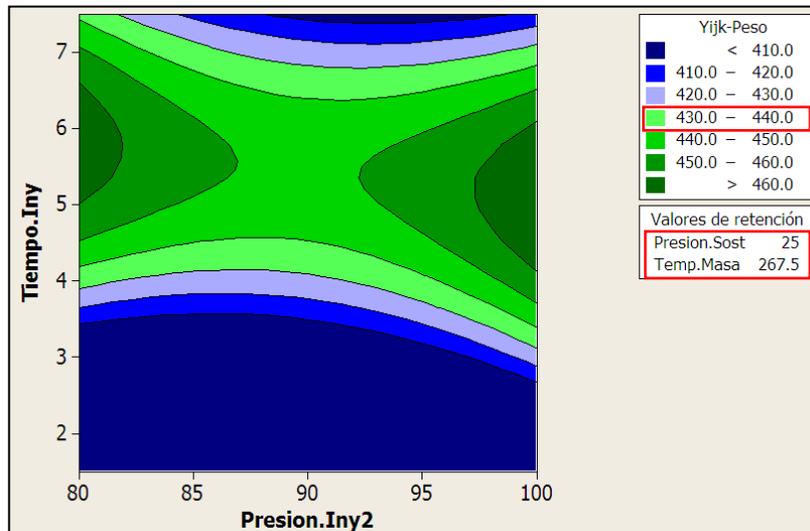


Grafica 12. Superficie de respuesta Yijk-Peso vs. Temp.Masa, Presión.Iny2

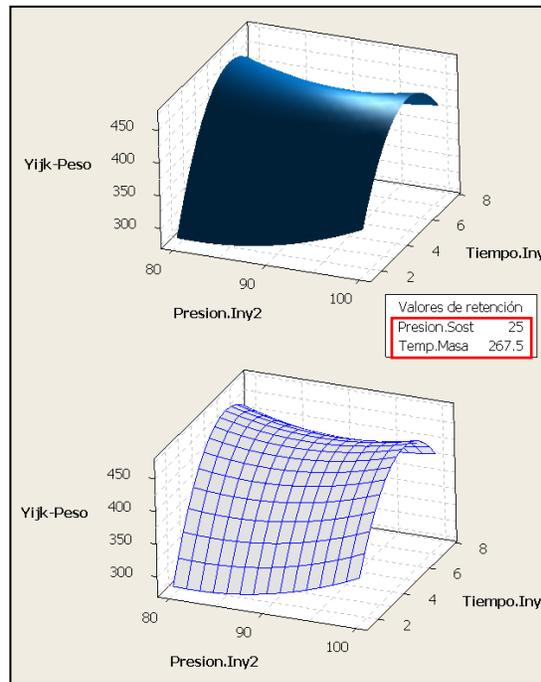
La 'Grafica 11' indica el área o región (color verde claro) donde se pueden obtener pesos de 430gr a 440gr para los factores de temperatura de masa y presión de inyección2, manteniendo los niveles de retención de Presión de

sostenimiento de 25% y un tiempo de inyección de 4.5s. Los contornos corresponden a una superficie con un punto silla (o minimax).

El análisis de la 'Grafica 12' revela que la Presión.Iny2 y la temperatura de masa tienen efectos cuadráticos en la respuesta "peso", mientras que la Presión de Sostenimiento y el tiempo de inyección solo tienen un efecto lineal.



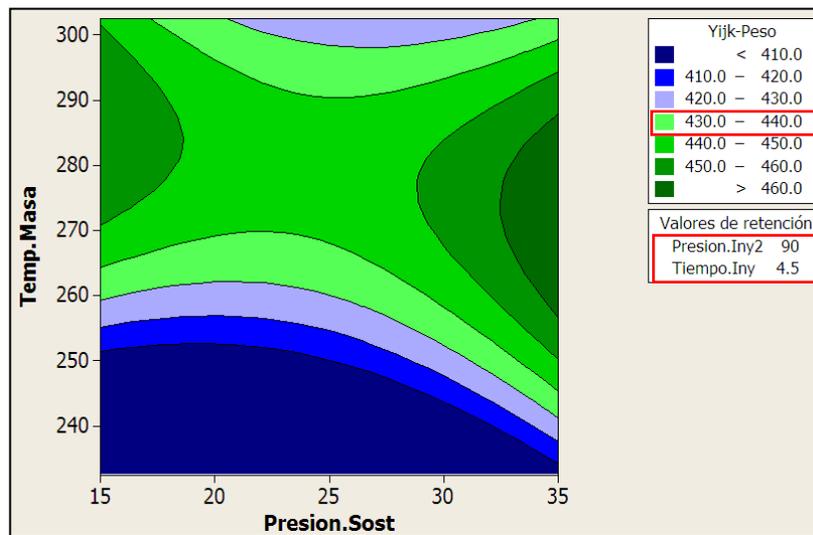
Grafica 13. Contorno de Yijk-Peso vs. Tiempo.Iny, Presión.Iny2.



Grafica 14. Superficie de respuesta Yijk-Peso vs. Tiempo.Iny, Presión.Iny2.

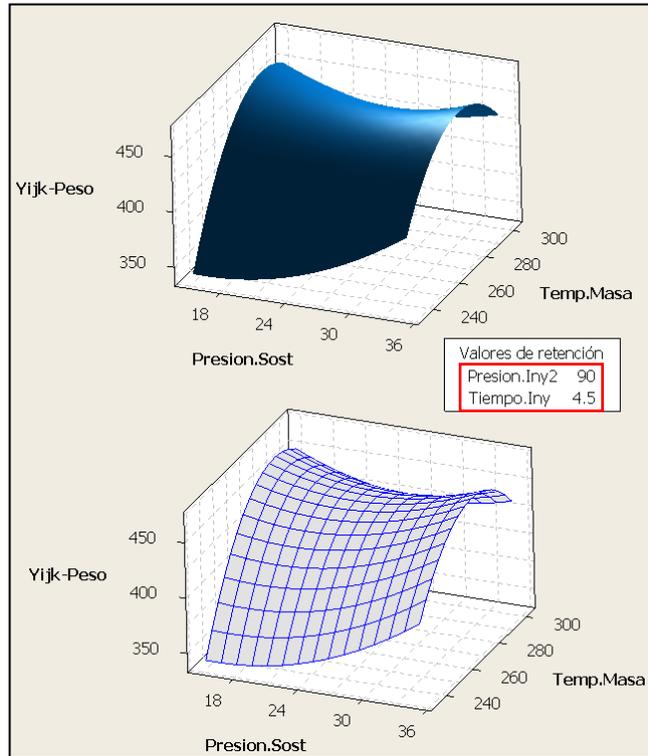
La 'Grafica 13' muestra para los factores Presión de Inyección2 y Tiempo de inyección el área o región (color verde claro) donde se pueden obtener pesos entre 430gr y 440gr, manteniendo la Presión de sostenimiento en 25% y la temperatura de masa en 267.5 °C.

La 'Grafica 14' revela que la Presión.Iny2 y el tiempo de inyección2 tienen efectos cuadráticos en la respuesta "peso", mientras que la Presión de Sostenimiento y la temperatura de masa solo tienen un efecto lineal. Por lo tanto, tiene sentido mantener fijos la Presión.Sost en 25% y la Temp.Masa en 267.5 °C. Los contornos corresponden a una superficie con un punto silla (o minimax).



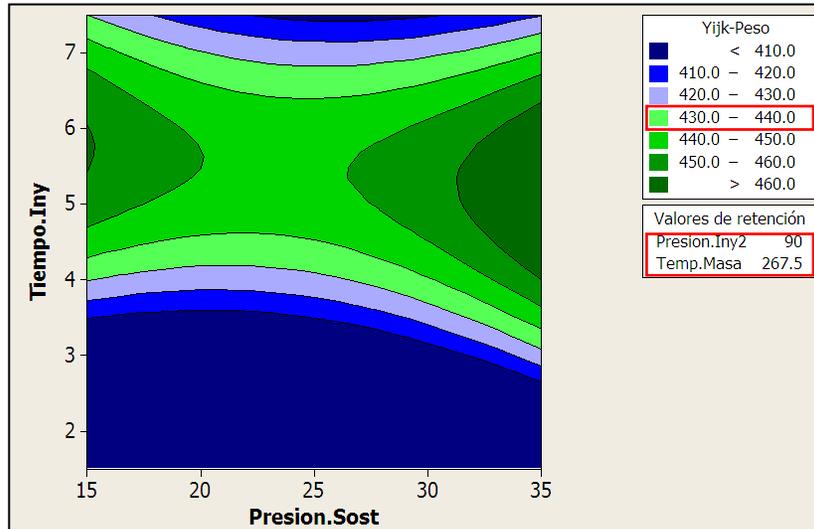
Grafica 15. Contorno de Yijk-Peso vs. Temp.Masa, Presión.Sost.

La 'Grafica 15' muestra el área o región (color verde claro) para los factores Temperatura de masa y Presión de Sostenimiento donde se pueden obtener pesos de 430gr a 440gr, manteniendo la Presión de inyección2 a 90% y el tiempo de inyección a 4.5s. Los contornos corresponden a una superficie con un punto silla (o minimax).

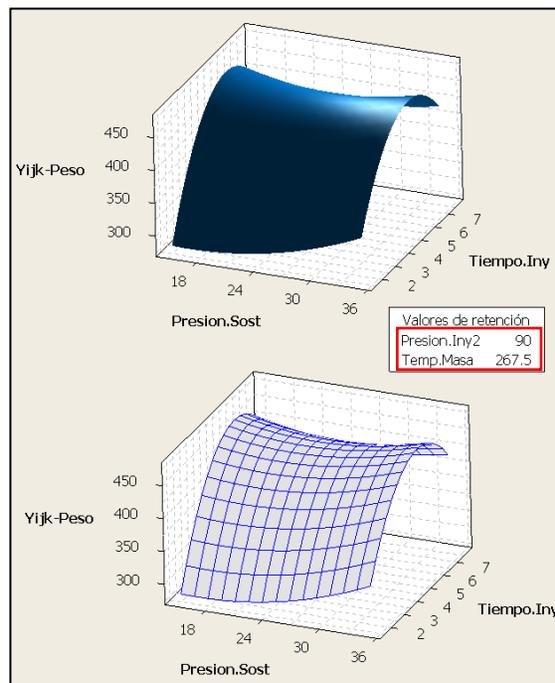


Grafica 16. Superficie de respuesta Yijk-Peso vs. Temp.Masa, Presión.Sost.

En la 'Grafica 16' muestra que la Presión de sostenimiento y la temperatura de la masa tienen efectos cuadráticos en la respuesta "peso", mientras que la Presión de inyección2 y el tiempo de inyección tienen un efecto lineal, los cuales se pueden mantener fijos.



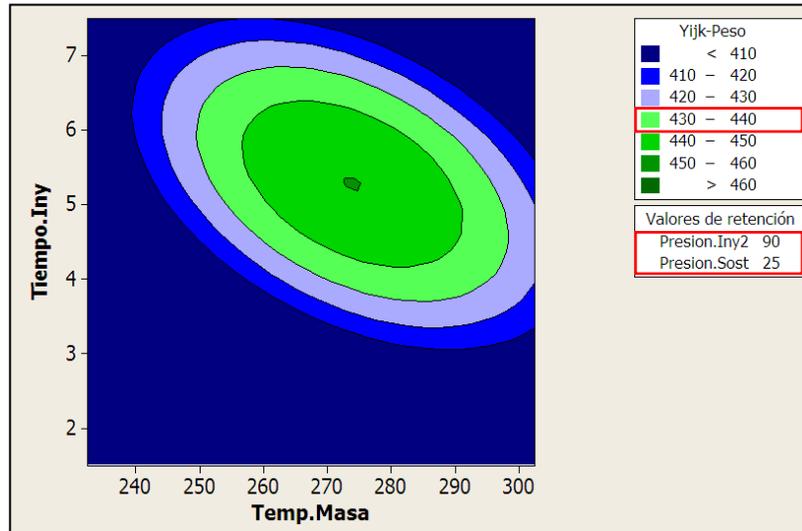
Grafica 17. Contorno de Yijk-Peso vs. Presión.Sost, Tiempo.Iny.



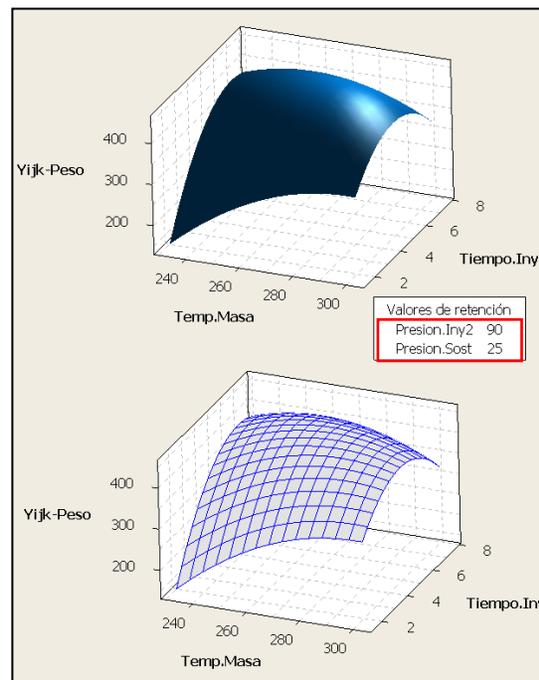
Grafica 18. Superficie de respuesta Yijk-Peso vs. Presión.Sost, Tiempo.Iny

La 'Grafica 17' muestra para los factores Presión de Sostenimiento y tiempo de inyección el área o región (color verde claro) donde se pueden obtener pesos de 430gr a 440gr, manteniendo la Presión de inyección2 en 90% y temperatura de masa en 267.5 °C. Los contornos corresponden a una superficie con un punto silla (o minimax).

La 'Grafica 18' indica que la Presión de Sostenimiento y tiempo de inyección tienen efectos cuadráticos en la respuesta "peso", mientras que la Presión de inyección2 y temperatura de masa tienen un efecto lineal en la respuesta, los cuales se pueden mantener fijos.



Grafica 19. Contorno de Yijk-Peso vs. Tiempo.Iny, Temp.Masa.



Grafica 20. Superficie de respuesta de Yijk-Peso vs. Tiempo.Iny, Temp.Masa

La 'Grafica 19' muestra para los factores temperatura de masa y tiempo de inyección el área o región (color verde claro) donde se pueden obtener pesos de 430gr a 440gr, manteniendo la Presión de inyección² en 90% y la Presión de Sostenimiento en 25%.

La 'Grafica 20' indica que la temperatura de masa y tiempo de inyección tienen efectos cuadráticos en la respuesta "peso", mientras que la Presión de inyección² y Presión de Sostenimiento tienen un efecto lineal en la respuesta, los cuales se pueden mantener fijos. Los contornos corresponden a una superficie de respuesta máxima.

4.2.3 Validación de Resultados.

Corridas de Confirmación.

Una vez que fueron encontrados los valores óptimos de los factores significativos por medio de la metodología de Diseño de Experimentos, se realizaron corridas (pruebas) de confirmación para observar las respuestas y evaluarlas. Antes de realizar estas corridas se actualizó la ficha de fabricación (Tabla 28) con los factores óptimos resultantes del Diseño Central Compuesto.

FICHA DE FABRICACIÓN PARA MAQUINA CHENDE												DEPARTAMENTO DE INGENIERIA																											
DESCRIPCIÓN:				FIN INST NEGRO /				NUM DE PARTE		E679-4112Q100 / E679-4115Q100																													
CLIENTE:		NIHON		M.P.		POLICARBONATO LEXAN EM1210 NEGRO / CAFÉ				MAQUINA:		560 (2)		COLOR:		NEGRO / CAFÉ																							
NUM CAVIDADE		1		PESO BRUTO		PESO NETO		430 gr - 440 gr		CICLO:		60 seg		TIPO CICLO		SEMI AUTOMÁTICO																							
TEMP		INYECCION				PLAST				CARGA				MELT D				DESCOMPRESION																					
WR		SPEED		PRES		POS		SPEED		PRES		B.P		POS		SPEED		PRES		POS																			
30		50		90		118		ST 1		50		60		20		50		DECOMP		45		45		8															
270		55		85		60		ST 2		50		60		20		125		DLY		INJ TERM		2.3																	
270		55		90		10		HOLD P				SOSTENIMIENTO				APERTURA																							
270		55		85		9		INJECT		SPEED		PRES		POS		OPENING		SPEED		PRES		POS																	
265		55		85		4		HOLD 1		20		2.5		SLOW		20		50		100		mm																	
265								HOLD 2		20		2		FAST		40		60		500		mm																	
265								HOLD 2		20		2		BREAK		20		25		600		mm																	
FAST				LOW PRE				HI PRE				CIERRE				CORE				NOYO				TIMER															
FAST CLA		50		50		150		SPEED		PRES		TIME		INJ. TIME		4.5		COOLING		35																			
LP. CLA		20		30		110		CORE IN						CYC ALM				RECYCLE																					
H.P. LOCK		55		90		6.3		CORE OUT						AIR EJECT 1				L.P. ALM																					
								CORE START BY		TIMER SET				PRE-PEC				PLAST DL																					
								IN POS		CLAMP T				CONTRAPRESION:		200		PSI																					
								OUT POS		OPEN TC																													
COLADA CALIENTE				EXPULSOR				SPEED				PRES				POS				FUNCTION				BOOS T				OF				POS SW				ON			
Z1		265		Z3		265		Z5		EJ FOR		20		25		105																							
Z2		265		Z4		265		Z6		EJ BACK		20		25		100																							
Notas: Mantener parámetros de acuerdo a la ficha para mantener un peso de 430 ± 2 gr para evitar rebabas o piezas incompletas.																																							
Parámetros óptimos. NO CAMBIAR. (Al incrementar el sostenimiento se incrementa la rebaba en la pieza).																																							
Parámetros recomendados, pueden variar su valor ± 5 puntos.																																							
Puede variar de 120mm a 125mm (manteniendo estos valores se evita el exceso de rebaba dentro de ventanas).																																							
Parámetros donde el proceso es estable y no hay necesidad de mover.																																							

Tabla 28. Factores para la corrida de confirmación (Ficha actualizada).

Se realizaron varias corridas de confirmación en el transcurso de 4 días, donde se recabaron la cantidad de N=220 datos de pesos. En el momento que se pesó cada pieza se verificó que no existiera ausencia de material en la pieza (pieza incompleta). Los pesos fueron registrados en la siguiente tabla de datos:

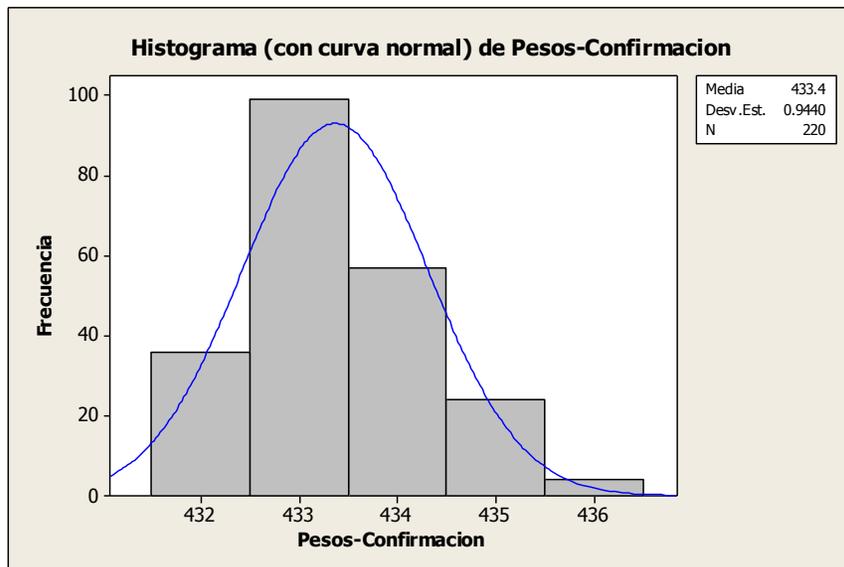
CORRIDAS DE CONFIRMACIÓN											
DIA 1 (Pesos gramos)						DIA 2 (Pesos gramos)					
Datos	Columna1	Columna2	Columna3	Columna4	Columna5	Columna1	Columna2	Columna3	Columna4	Columna5	Columna6
1	435	435	434	434	435	432	433	432	432	433	432
2	435	434	434	433	434	432	432	433	433	433	432
3	436	434	435	434	434	432	432	433	432	433	432
4	436	434	434	433	434	432	433	433	433	433	433
5	435	434	435	434	434	433	432	433	432	433	433
6	435	433	433	434	433	432	432	432	433	433	432
7	436	433	433	434	434	432	432	433	432	432	433
8	435	433	434	435	434	432	432	433	433	432	433
9	434	433	433	435	433	432	432	432	433	433	432
10	434	433	433	435	434	432	432	432	433	432	433
DIA 3 (Pesos gramos)						DIA 4 (Pesos gramos)					
Datos	Columna1	Columna2	Columna3	Columna4	Columna5	Columna1	Columna2	Columna3	Columna4	Columna5	Columna6
1	433	433	434	433	433	434	435	434	434	433	434
2	432	433	434	433	433	434	434	433	433	433	433
3	433	434	433	433	433	435	434	433	434	434	433
4	433	433	433	433	434	435	433	435	434	434	433
5	433	433	433	433	433	436	434	434	435	433	434
6	432	434	433	433	434	435	435	433	435	433	432
7	433	433	433	433	434	434	434	433	435	433	433
8	433	433	433	433	434	434	434	435	434	433	433
9	433	433	433	433	433	434	435	433	434	434	433
10	433	434	433	434	433	434	435	434	433	433	434

Tabla 29. Datos de Corridas de Confirmación.

Los registros de pesos de las corridas de confirmación se introdujeron en el software Minitab15 para analizar los datos. Los resultados obtenidos fueron:

Estadísticas descriptivas: Pesos-Confirmación

				Media del Error				
Variable	N	N*	Media	estándar	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	
Pesos-Confirmacion	220	0	433.37	0.0636	0.944	0.891	0.22	
Variable	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo			
Pesos-Confirmacion	432.00	433.00	433.00	434.00	436.00			



Grafica 21. Histograma – Corridas de Confirmación

Se observa que los nuevos pesos en la 'Grafica 21' tienen una mejor distribución, es decir, los datos tienen una mayor exactitud; muestra que tan cerca está el promedio del proceso del objetivo (media), pero no es tan preciso ya que los datos necesitarían estar más cerca de la media.

4.3 Capacidad de proceso - Datos actuales del “Fin Instrument” (con doble especificación).

Los procesos tienen variables de salida o de respuesta, las cuales deben cumplir con ciertas especificaciones a fin de considerar que el proceso está funcionando de manera satisfactoria. Evaluar la habilidad o capacidad de un proceso consiste en conocer la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada, lo cual permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria (cumple especificaciones) (Gutierrez & De la Vara, 2009).

Para este proyecto se tiene una característica de calidad llamada “peso” como variable de salida de la pieza “Fin Instrument”, en donde para considerar que existe calidad, las mediciones deben ser igual a cierto valor nominal o estar dentro de ciertos límites, en este caso con el nuevo análisis de pesos obtenidos de

las corridas de confirmación, se determinó que el valor nominal será de 435gr, donde ahora los límites de especificación son; límite inferior de 430gr (EI) y límite superior de 440gr (ES), por lo que los nuevos pesos deberán estar dentro de los límites definidos, para asegurar la calidad en cuanto a “piezas completas” del “Fin Instrument”.

Índice Cp.

El índice de capacidad potencial del proceso, Cp, se define de la siguiente manera:

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

Donde σ representa la desviación estándar del proceso, mientras que “ES” y “EI” son las especificaciones superior e inferior para la característica de calidad. Como se puede observar, el índice “Cp” compara el ancho de las especificaciones o la variación tolerada para el proceso con la amplitud de la variación real de este:

$$C_p = \frac{\text{Variación tolerada}}{\text{Variación real}}$$

Decimos que 6σ (seis veces la desviación estándar) es la variación real, debido a las propiedades de la distribución normal, en donde se afirma que entre $\mu \pm 3\sigma$ se encuentra 99.73% de los valores de una variable con distribución normal. Incluso si no hay normalidad, en $\mu \pm 3\sigma$ ⁹ se encuentra un gran porcentaje de la distribución debido a la desigualdad de Chebyshev y a la regla empírica.

⁹ Hay una definición del índice Cp que es independiente de la distribución de la característica de calidad: el reporte técnico de ISO 12783 define al Cp de la siguiente manera: $\frac{ES - EI}{P_{0.99865} - P_{0.00135}}$ donde $P_{0.99865}$ es el percentil 99.865 de la distribución de la característica de calidad y $P_{0.00135}$ es el percentil 0.135. De esta manera, cualquiera que sea la distribución entre estos percentiles, se ubicara el 99.73% de los valores de la característica de calidad.

Interpretación del Índice Cp.

Para que el proceso sea considerado potencialmente capaz de cumplir con especificaciones, se requiere que la variación real (natural) siempre sea menor a la variación tolerada. De aquí que lo deseable es que el índice Cp sea mayor que 1; y si el valor del índice Cp es menor que uno, es una evidencia de que el proceso no cumple con las especificaciones (Gutierrez & De la Vara, 2009).

Calculo del nuevo Índice Cp para el proceso del “Fin Instrument”.

Para estudio de este proceso, con la media de $\mu=433.4$ y la desviación estándar de $\sigma=0.944$ de los pesos de confirmación, se calculó la nueva capacidad del proceso de inyección de esta pieza, para verificar si con estos nuevos datos y con los nuevos límites de especificación el proceso es capaz.

$$C_p = \frac{ES - EI}{6\sigma} = \frac{440 - 430}{6(0.944)} = \frac{10}{5.664} = 1.7$$

Con un $C_p = 1.7$ indica que el proceso es adecuado ya que es mayor a 1.33 como lo muestra la ‘Tabla 30’. Si se mantiene el Cp de 1.7 en este proceso de inyección solo 0.340 partes por millón estarían fuera de especificación (Tabla 31).

VALOR DEL ÍNDICE C_p	CLASE O CATEGORÍA DEL PROCESO	DECISIÓN (SI EL PROCESO ESTÁ CENTRADO)
$C_p \geq 2$	Clase mundial	Se tiene calidad Seis Sigma.
$C_p > 1.33$	1	Adecuado.
$1 < C_p < 1.33$	2	Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto.
$0.67 < C_p < 1$	3	No adecuado para el trabajo. Es necesario un análisis del proceso. Requiere de modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria.
$C_p < 0.67$	4	No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias.

Tabla 30. Valores del Cp y su interpretación (b) (Gutierrez & De la Vara, 2009).

VALOR DEL ÍNDICE (CORTO PLAZO)	PROCESO CON DOBLE ESPECIFICACIÓN (ÍNDICE C_p)		CON REFERENCIA A UNA SOLA ESPECIFICACIÓN (C_{pu} , C_{pl} , C_{pk})	
	% FUERA DE LAS DOS ESPECIFICACIONES	PARTES POR MILLÓN FUERA (PPM)	% FUERA DE UNA ESPECIFICACIÓN	PARTES POR MILLÓN FUERA (PPM)
1.0	0.2700%	2 699.934	0.1350%	1 349.967
1.1	0.0967%	966.965	0.0483%	483.483
1.2	0.0318%	318.291	0.0159%	159.146
1.3	0.0096%	96.231	0.0048%	48.116
1.4	0.0027%	26.708	0.0013%	13.354
1.5	0.0007%	6.802	0.0003%	3.401
1.6	0.0002%	1.589	0.0001%	0.794
1.7	0.0000%	0.340	0.0000%	0.170
1.8	0.0000%	0.067	0.0000%	0.033
1.9	0.0000%	0.012	0.0000%	0.006
2.0	0.0000%	0.002	0.0000%	0.001

Tabla 31. Cantidad de piezas malas de acuerdo a los índices de C_p (b) (Gutierrez & De la Vara, 2009).

5. CONCLUSION Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSION.

Con esta investigación se cumplió el objetivo general, donde se encontraron los factores significativos del proceso de moldeo por inyección de plástico de la pieza “Fin Instrument” que causan el defecto “piezas incompletas”, en los cuales se logró encontrar el nivel óptimo de cada factor:

- Presión de inyección = 85%
- Presión de sostenimiento = 20%
- Temperatura de masa = 270 °C
- Tiempo de inyección = 4.3s

Para evitar generar piezas incompletas se debe establecer y mantener los niveles óptimos encontrados, en el proceso de moldeo por inyección de plástico.

Se redujo de “359” piezas incompletas como promedio mensual que se producían anteriormente en el proceso de inyección de la pieza “Fin Instrument”, a “0” piezas durante la corrida de confirmación y de toda la producción transcurrida en el mes de agosto del 2012 por medio de la implementación de Diseño de Experimentos. Por lo tanto en el mes de agosto se tuvo un ahorro aproximado de \$30,000.00, lo cual al año proyectaría un ahorro de aproximadamente \$360,000.00 (tan solo de la eliminación y/o reducción del defecto “piezas incompletas”).

Por otro lado, se establecieron límites de especificación donde la pieza cumple con las características de calidad de “piezas completas” y sin mucha “rebaba”, siendo estos:

- Límite Inferior de Especificación (LIE) = 430gr
- Límite Superior de Especificación (LSE) = 440gr

La Hipótesis nula ($H_0: \mu \geq 430\text{gr}$) establecida en este proyecto se cumple, es decir, fue aceptada ya que los resultados de la respuesta “peso” de las piezas son mayores o iguales que 430gr. Por lo cual, la Hipótesis alternativa ($H_a: \mu \leq 430\text{gr}$) se rechaza.

La información y resultados de esta investigación podrán ser utilizados como materiales de apoyo para el área de Calidad, Ingeniería y Producción. Les servirá como base de consulta para poder aplicar un Diseño de Experimentos en algún otro proceso de inyección de plástico de cualquier otra pieza de la empresa Industrias Camca S. A. de C. V.

RECOMENDACIONES.

- Utilizar el check-list de arranque de máquina propuesto (ver anexo).
- Adquirir una báscula adecuada para el área de producción.
- Colocar sensor en la tolva para detectar cuando baje el material del nivel crítico.
- Dar el tiempo de secado correcto al material (Policarbonato) que es de 4hr a 120°C.

6. LITERATURA CITADA.

- Bichler, M., Seibold, G., Jager, A., Rossne, F., & Dr. Pahlke, S. (1997). La inyección en forma breve y sucinta. Mannesmann Demag Kunststofftechnik.
- Bisgaard, S., & Gersbakh, I. (2000). 2k-p Experiments with Binary Responses: Inverse Binomial sampling. *Journal of Quality Technology*, 32(2): p. 148-156.
- Boronat, T. (2009). Estudio y modelización de la procesabilidad mediante moldeo por inyección de materiales termoplásticos reciclados. Tesis Doctoral. Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Brent, S. A. (2000). *Plastics materials and processing*. New Jersey: Prentice Hall.
- Castillo Reyna, L. (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. Universidad de San Carlos de Guatemala: Facultad de Ingeniería.
- Chen, W. C., Tai, P. H., Wang, M. W., Deng, W. J., & Chen, C. (2008). A neural network-based approach for a dynamic quality predictor in plastic injection molding process. *Expert Systems with Applications*, 35(3), 843–849.
- Chien, R. D., Chen, S. C., Lee, P. H., & Huang, J. S. (2004). Study on the molding characteristics and mechanical properties of injection-molded foaming polypropylene parts. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(4), 429–444.
- Chin-Huang, S., Juhn-Horng, C., & Long-Jye, S. (2010). Quality control of the injection molding process using an EWMA predictor and minimum–variance controller. *International Journal Adv. Manufacturing Technology*, 48, 63–70.
- Consejo Técnico del Instituto Mexicano del Plástico Industrial, S. C. (2000). *Enciclopedia del Plástico Tomo 1*. Mexico, D.F.: Centro Empresarial del Plástico S. A. DE C.V.
- Czitrom, V. (1999). One factor at a time versus Designed Experiments. *The American Statistician*, 53(2): p. 126-131.
- Del Vecchio, R. J. (1997). *Understanding design experiments*. Munich: Hanser Publishers.
- Deming, W. E. (1982). *Out of the crisis*. Cambridge, MA: MIT Center for Advanced Engineering Study.
- Farshi, B., Gheshmi, S., & Miandoabchi, E. (2011). Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm. *Materials and Design*, 32, 414–423.
- Fischer, J. M. (2003). *Handbook of Moulded Part Shrinkage and Warpage*. Norwich: Plastics Design Library/William Andrew Inc.

- Gutierrez, P. H., & De la Vara, S. R. (2009). *Control Estadísticos de Calidad y Seis Sigma*. Mexico, D.F.: McGraw Hill.
- Keun, P., & Jong Ho, A. (2004). Design of experiment considering two-way interactions and its application to injection molding processes with numerical analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 146, 221–227.
- Kwai-Sang, C., & Wong, T. (1996). Knowledge-based Evaluation for the Conceptual Design Development of Injection Molding Parts. Elsevier Science Ltd., Vol. 9, No. 4, pp. 359-376.
- Lau, K., & Tse, T. (1997). Enhancement of plastic injection moulding quaSty through the use of the ABLPC nozzle. *Journal of Materials Processing Technology*, 69, 55-57.
- Lotti, C., Ueki, M. M., & Bretas, R. E. (2002). Prediction of the shrinkage of injection molded iPP plaques using artificial neural networks. *Journal of injection molding technology*, 6, 157-176.
- Montgomery, D. C. (2004). *Design and Analysis of Experiments*. Limusa, S.A and John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. New York: Limusa, S.A and John Wiley & Sons.
- Ozcelik, B., & Erzurumlu, T. (2005). Determination of effecting dimensional parameters on warpage of thin shell plastic parts using integrated response surface method and genetic algorithm. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32, 1085–1094.
- Puertas, I., & Luis, C. J. (2004). A study of optimization of machining parameter for electrical discharge machining of boron carbide. *Materials and Manufacturing Processes*, 1041-1070.
- Ryan, T. P. (2007). *Modern Experimental Design*. John Wiley & Sons, Inc.
- SadAbadi, H., & Ghasemi, M. (2007). Effects of some injection molding process parameters on fiber orientation tensor of short glass fiber polystyrene composites (SGF/PS). *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(17),1729–1741.
- Schreiber, A., & Michaeli, W. (2009). Online Control of the Injection Molding Process Based on Process Variables. *Advances in Polymer Technology*, Vol. 28, No. 2, 65–76.
- Seow, L., & Lam, Y. (1997). Optimizing flow in plastic injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 72, 333-341.
- Sofuoglu, H. (2006). A technical note on the role of process parameters in predicting flow behavior of plasticine using desing of experiment. *Journal of Materials Processing Technology*, 148-153.

- Tong, J., Tsung, F., & Yen, B. (2004). A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 523-531.
- Walpole, M. (1999). *Probabilidad y Estadística Para Ingenieros*. Prentice Hall Hispanoamerica 6ta. edición.
- Yang, Y. K. (2006a). Optimization of a photo resists coating process for photolithography in wafer manufacturing via design of experiments method. *Microelectronics International*, 23(3), 26–32.
- Yang, Y. K. (2006b). Optimization of injection-molding process of short glass fiber and polytetrafluoroethylene reinforced polycarbonate composites via design of experiments method: A case study. *Materials and Manufacturing Processes*, 21(8), 915–921.

7. ANEXOS.

7.1 Arranque de Máquina (Check-list).

Antes de aplicar el Diseño de Experimentos se vio la necesidad de elaborar un Check-list de arranque de máquina (Tabla 32), por el motivo de que no existía un estándar de arranque de máquina y no se percataban de realizar ciertas actividades importantes antes de dar inicio a la fabricación de las piezas. Para este proceso hay actividades básicas que se deben hacer previamente para evitar problemas durante el proceso de inyección de esta pieza. Las actividades a verificar durante el proceso de arranque de la máquina EM-560(2) de la pieza "Fin Instrument" son:

1. El material sea el correcto (Cada turno).
2. Precalentar el material 4hr. antes del montaje del molde a 120 °C (Cada arranque).
3. Precalentar el molde 1hr. antes del montaje, debe estar entre 70°C - 95°C (Cada arranque).
4. Que el cañón se encuentre limpio y purgado (Cada arranque).
5. La boquilla se encuentre limpia y no esté tapada (Cada arranque).
6. Las caras del molde estén libres de rebabo y/o suciedad (Cada arranque y cada turno).
7. Llenar la tolva a un 80% de su capacidad con el material de trabajo, manteniendo el nivel constante para evitar variaciones de presión (Cada turno).
8. Las resistencias del cañón se encuentren en la temperatura correcta (Cada arranque y cada turno).
9. Abrir la alimentación del material (Cada arranque).
10. Fijar las condiciones de operación aumentándolas lentamente a sus niveles establecidos (Cada arranque).
11. Iniciar el ciclo, haciendo disparos al vacío para medir la temperatura de masa fundida (Cada arranque).
12. Iniciar el ciclo de molde (Cada turno).

M&S		ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1	El material en el molde	Cada hora											
2	Presionar el material 5hr. Antes del moldeo	Cada Arranque											
3	Presionar el molde 5hr. Antes del moldeo	Cada Arranque											
4	Verificar que el molde se encuentre limpio y pasado	Cada Arranque											
5	La boquilla se encuentra limpia y es lavada.	Cada Arranque											
6	Las sacas del molde extra libres de rebaba y/o suciedad.	Cada Arranque y Cada Turno											
7	Usar la balanza con HX de su capacidad con el material de trabajo, asegurando el nivel adecuado para evitar variaciones de peso.	Cada hora											
8	Las Revoluciones del Cilindro se encuentran en la Temperatura adecuada	Cada Arranque y Cada Turno											
9	Abrir la alimentación del material.	Cada Arranque											
10	Fijar los medidores de presión, asegurados inicialmente con niveles calibrados.	Cada Arranque											
11	Iniciar el ciclo, haciendo esperar al agua para medir la temperatura de masa fundida.	Cada Arranque											
12	Iniciar el ciclo de moldeo	Cada hora											

CODIGOS DE LOS TURNOS DE AJUSTADOR: 1ero.(\) 2do.(/) 3ero.(-) 4to.(*)

MARQUE "FS" (FUERA DE SERVICIO) EN LA CELDA, SI LA MAQUINA O EL COMPONENTE NO ESTA FUNCIONANDO ■ MA : NO AP

NOTA: NUNCA SE DEBE DE ARRANCAR LA MAQUINA EN FRIJO, YA QUE EN CASO DE QUE CONTenga MATERIAL EN EL CILINDRO PROV

Tabla 32. Check-list de Arranque de Máquina EM560-2.

7.2 Ajuste Factorial del DFF.

Ajuste factorial: Yijk-Peso vs. Pres.Iny1, Pres.Iny2, ...

Efectos y coeficientes estimados para Yijk-Peso (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef	Coef. de EE	T	P
Constante		417.91	0.1755	2381.46	0.000
Pres. Iny1	-0.41	-0.21	0.1755	-1.18	0.242
Pres. Iny2	-36.21	-18.11	0.1755	-103.18	0.000
Pres. Iny3	1.11	0.56	0.1755	3.17	0.002
Vel. Iny1	5.36	2.68	0.1755	15.28	0.000
Vel. Iny2	-4.04	-2.02	0.1755	-11.50	0.000
Vel. Iny3	1.34	0.67	0.1755	3.81	0.000
Temp. Mat	28.69	14.34	0.1755	81.74	0.000
Pres. Sost	5.86	2.93	0.1755	16.70	0.000
Tiempo. Iny	38.91	19.46	0.1755	110.87	0.000
Pres. Iny1*Pres. Iny2	2.01	1.01	0.1755	5.73	0.000

Pres.Iny1*Pres.Iny3	-6.61	-3.31	0.1755	-18.84	0.000
Pres.Iny1*Vel.Iny1	-2.91	-1.46	0.1755	-8.30	0.000
Pres.Iny1*Vel.Iny2	0.84	0.42	0.1755	2.39	0.018
Pres.Iny1*Temp.Mat	-1.24	-0.62	0.1755	-3.53	0.001
Pres.Iny1*Pres.Sost	6.89	3.44	0.1755	19.62	0.000

S = 2.21970 PRESS = 6554.18
R-cuad. = 99.54% R-cuad. (pred.) = 95.75% R-cuad. (ajustado) = 99.49%

Los datos muestran:

- **Efectos de interacción:** el modelo contiene seis efectos de interacción de dos factores. Los resultados indican que existen interacciones significativas ya que los términos tienen valores “p” menores que 0.05. Por lo tanto, se debe ser precavido en la interpretación ya que existe ¹⁰confusión en el diseño.
- **Efectos principales:** el modelo contiene nueve efectos principales, que se pueden evaluar en ausencia de interacciones. Los valores “p” para los nueve efectos principales son menores que 0.05, con excepción al factor Presion.Iny1, por lo tanto, existe evidencia de un efecto significativo. Es decir, la “Presión de inyección 1” no impacta significativamente en el peso de la pieza (respuesta).

Análisis de varianza para Yijk-Peso (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F
Efectos principales	9	149245	149245	16582.8	3365.64
2-Interacciones de (No.) factores	6	4237	4237	706.2	143.33
Error residual	144	710	710	4.9	
Error puro	144	709	709	4.9	
Total	159	154192			

Fuente	P
Efectos principales	0.000
2-Interacciones de (No.) factores	0.000
Error residual	
Error puro	
Total	

¹⁰ **Confusión:** si se tiene un diseño fraccionado, algunos de los efectos se confunden entre sí. Es decir, no puede estimar todos los efectos separadamente. Por ejemplo, si el Factor A se confunde con la interacción BCD de tres factores, entonces el efecto estimado para A también incluye cualquier efecto debido a la interacción BCD. Se dice que los efectos que se confunden forman una estructura de alias.

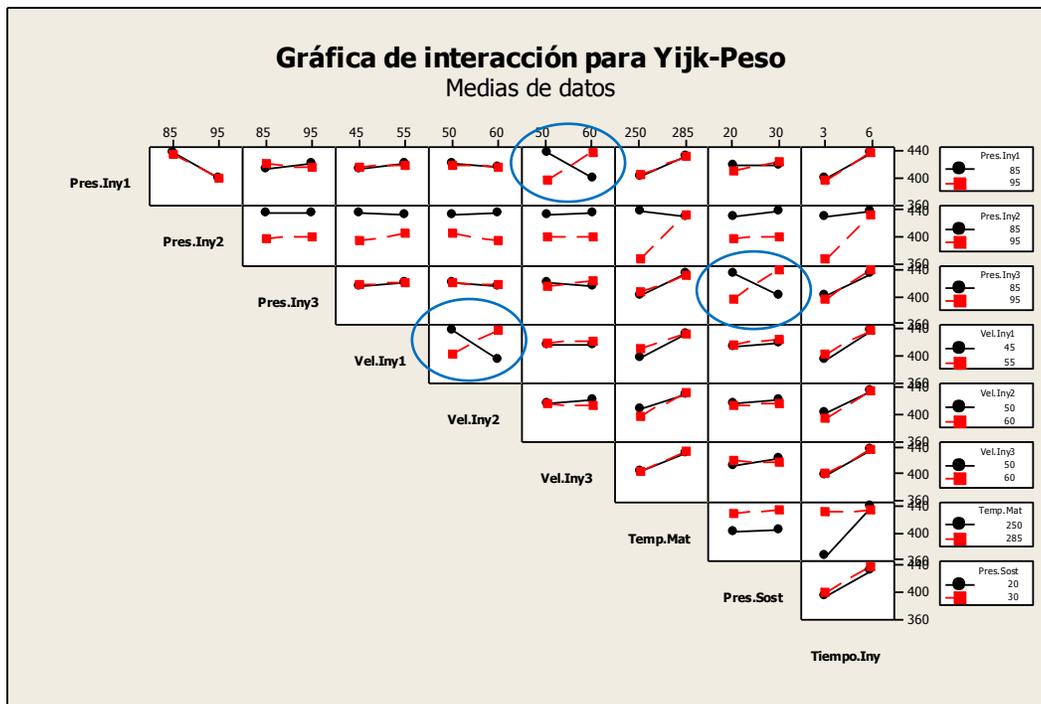
Observaciones inusuales de Yijk-Peso

Obs	OrdenEst.	Yijk-Peso	Ajuste	Ajuste SE	Residuo	Residuo estándar
3	3	349.000	354.300	0.702	-5.300	-2.52R
19	19	345.000	354.300	0.702	-9.300	-4.42R
24	24	348.000	354.800	0.702	-6.800	-3.23R
40	40	350.000	354.800	0.702	-4.800	-2.28R
67	67	363.000	354.300	0.702	8.700	4.13R
83	83	360.000	354.300	0.702	5.700	2.71R
99	99	349.000	354.300	0.702	-5.300	-2.52R
115	115	361.000	354.300	0.702	6.700	3.18R
131	131	346.000	354.300	0.702	-8.300	-3.94R
136	136	360.000	354.800	0.702	5.200	2.47R
147	147	363.000	354.300	0.702	8.700	4.13R

R denota una observación con un residuo estandarizado grande.

Coefficientes estimados para Yijk-Peso utilizando datos en unidades descodificadas

Término	Coef
Constante	-351.443
Pres.Iny1	8.67786
Pres.Iny2	-7.24375
Pres.Iny3	12.0138
Vel.Iny1	5.77875
Vel.Iny2	-1.91125
Vel.Iny3	0.133750
Temp.Mat	1.45607
Pres.Sost	-11.8113
Tiempo.Iny	12.9708
Pres.Iny1*Pres.Iny2	0.0402500
Pres.Iny1*Pres.Iny3	-0.132250
Pres.Iny1*Vel.Iny1	-0.0582500
Pres.Iny1*Vel.Iny2	0.0167500
Pres.Iny1*Temp.Mat	-0.00707143
Pres.Iny1*Pres.Sost	0.137750



Grafica 22. Interacciones de parámetros del DFF.

La ‘Grafica 22’ de interacciones muestra el efecto que tiene cada factor al interactuar con otros factores. En esta grafica se puede observar que las interacciones significativas son la “Presión de inyección1*Velocidad de inyección3”, la “Velocidad de inyección1*Velocidad de inyección2” y “Presión de inyección3*Presión de Sostenimiento”.

Variabilidad explicada por el modelo DFF.

Con este modelo el error cuadrático “SC error” muestra que estamos explicando el 96.79% (en color rojo) de la variación en el proceso, la cual está dada por:

$$1 - \left(\frac{SC\ Error}{SC\ Total} \right) \text{ por lo tanto; } 1 - \left(\frac{4947}{154192} \right) = 0.9678\%$$

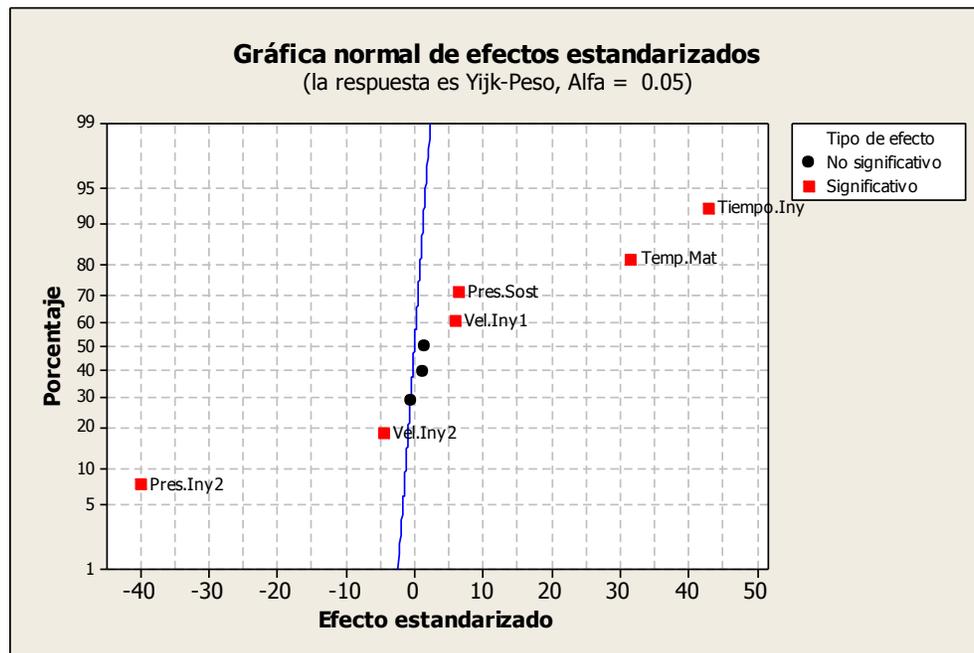
Así, la variabilidad explicada por el defecto significativo “Presión de Inyección2 es $\frac{52454}{154192}(100) = 34.018\%$, la explicada por la Velocidad de Inyección1 es $\frac{1150}{154192}(100) = 0.74\%$, la explicada por la Velocidad de inyección2 es

$\frac{652}{154192}(100) = 0.4228\%$, la explicada por la temperatura de material es $\frac{32919}{154192}(100) = 21.349\%$, la explicada por la presión de sostenimiento es $\frac{1375}{154192}(100) = 0.89\%$ y la explicada por el tiempo de inyección es $\frac{60567}{154192}(100) = 39.28\%$. La variabilidad no explicada por el diseño experimental es $\frac{4947}{154192}(100) = 3.208\%$.

Observaciones inusuales de Yijk-Peso

Obs	Yijk-Peso	Ajuste	Ajuste SE	Residuo	Residuo estándar
3	349.000	364.550	1.436	-15.550	-2.80 R
14	421.000	432.350	1.436	-11.350	-2.04 R
19	345.000	364.550	1.436	-19.550	-3.52 R
35	353.000	364.550	1.436	-11.550	-2.08 R
46	420.000	432.350	1.436	-12.350	-2.22 R
99	349.000	364.550	1.436	-15.550	-2.80 R
131	346.000	364.550	1.436	-18.550	-3.34 R
142	421.000	432.350	1.436	-11.350	-2.04 R

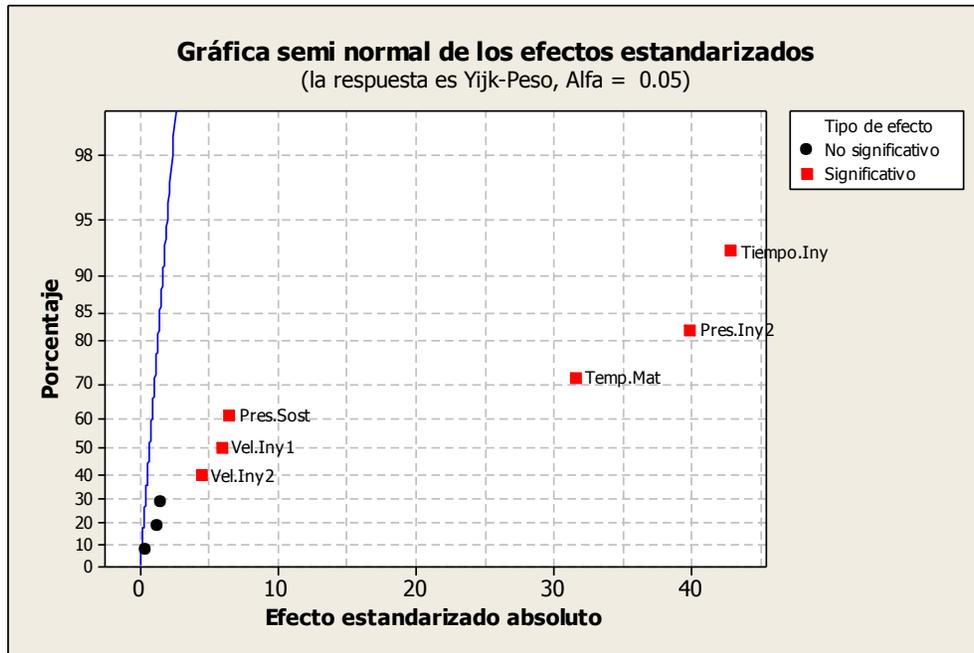
R denota una observación con un residuo estandarizado grande.



Grafica 23. Grafica normal de efectos estandarizados.

La 'Grafica 23' muestra que los puntos que no se sitúan cerca de la línea señalan efectos significativos. Tales efectos son más grandes y generalmente están más alejados de la línea ajustada que los efectos no importantes. Por opción

predeterminada, el software “Minitab15” utiliza un nivel α de 0.05 y etiqueta cualquier efecto que sea significativo.



Grafica 24. Grafica semi normal-efectos estandarizados.

Existen seis efectos significativos ($\alpha = 0.05$) como se puede observar en la ‘Grafica 24’. Muestra que el efecto más grande es el “Tiempo de inyección” porque es el efecto que está más lejos de la línea. El factor “Velocidad de inyección2” es el más pequeño porque es el que se encuentra más cerca de la línea.

7.3 Efectos lineales, de interacción y cuadráticos del DCC.

El análisis se hizo utilizando unidades sin codificar.

Coefficientes de regresión estimados de Yijk-Peso

Término	Coef	SE Coef	T	P
Constante	-4745.20	1235.72	-3.840	0.000
Presion.Iny2	-9.28	17.52	-0.530	0.597
Presion.Sost	19.18	13.69	1.401	0.164
Temp.Masa	32.75	4.70	6.964	0.000
Tiempo.Iny	336.75	44.86	7.507	0.000
Presion.Iny2*Presion.Iny2	0.18	0.08	2.156	0.033
Presion.Sost*Presion.Sost	0.18	0.08	2.133	0.035
Temp.Masa*Temp.Masa	-0.04	0.01	-6.071	0.000
Tiempo.Iny*Tiempo.Iny	-10.00	0.93	-10.759	0.000
Presion.Iny2*Presion.Sost	-0.10	0.11	-0.913	0.363
Presion.Iny2*Temp.Masa	-0.06	0.03	-2.000	0.047
Presion.Iny2*Tiempo.Iny	-0.69	0.36	-1.900	0.060

Presion.Sost*Temp.Masa	-0.06	0.03	-1.836	0.069
Presion.Sost*Tiempo.Iny	-0.57	0.36	-1.553	0.123
Temp.Masa*Tiempo.Iny	-0.56	0.10	-5.416	0.000

Efectos lineales: el modelo contiene cuatro efectos lineales (Presión de Inyección2, Presión de Sostenimiento, Temperatura de masa y Tiempo de Inyección).

El valor “p” de “0” para Temperatura de masa es menor que 0.05. Por lo tanto, existe un efecto lineal significativo para Temperatura. Es decir, la respuesta difiere dependiendo de la temperatura de reacción. Lo mismo sucede con el factor de tiempo de inyección.

El valor “p” de 0.597 para la presión de inyección2 no es menor que 0.05. Por lo tanto, no hay un efecto significativo de este factor. Es decir, la respuesta no cambia cuando cambia la presión de inyección2. Lo mismo sucede con el factor de presión de sostenimiento.

Efectos de interacción: el modelo contiene ocho interacciones de dos factores. El valor $p > 0.05$ de las interacciones (Presion.Iny2*Presion.Sost, Pres.Iny2*Temp.Masa, Pres.Iny2*Tiempo.Iny y Pres.Sost*Temp.Masa), constituyen un efecto de interacción significativo. Es decir, el efecto de la Presión.Iny2 en la respuesta peso depende de la Presión.Sost, de la Temp.Masa y del Tiempo.Iny. Así como el efecto de la Pres.Sost en la respuesta depende de la Temp.Masa.

Efectos cuadráticos: el modelo contiene cuatro efectos cuadráticos (Presion.Iny2*Presion.Iny2, Presion.Sost*Presion.Sost, Temp.Masa*Temp.Masa, Tiempo.Iny*Tiempo.Iny). Los términos cuadráticos se utilizan para evaluar si existe o no una curvatura (cuadrática) en la superficie de respuesta. Dado que los términos cuadráticos se identificaron como significativos en la tabla de análisis de varianza ($p=0$).

Los valores “p” de los efectos cuadráticos (Presion.Iny2*Presion.Iny2=0.033/Presion.Sost*Presion.Sost=0.035/Temp.Masa*Temp.Masa=0/Tiempo.Iny*Tiempo.Iny=0). Son menores que 0.05. Es decir, la relación que tienen con la respuesta sigue una línea curva, y no una línea recta.

Análisis de varianza de Yijk-Peso

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Regresión	14	267993	267993	19142.3	31.94	0.000
Lineal	4	139736	67526	16881.6	28.16	0.000
cuadrado	4	102148	102148	25537.0	42.60	0.000
interacción	6	26109	26109	4351.5	7.26	0.000
Error residual	135	80918	80918	599.4		
Falta de ajuste	10	80430	80430	8043.0	2060.76	0.000
Error puro	125	488	488	3.9		
Total	149	348911				

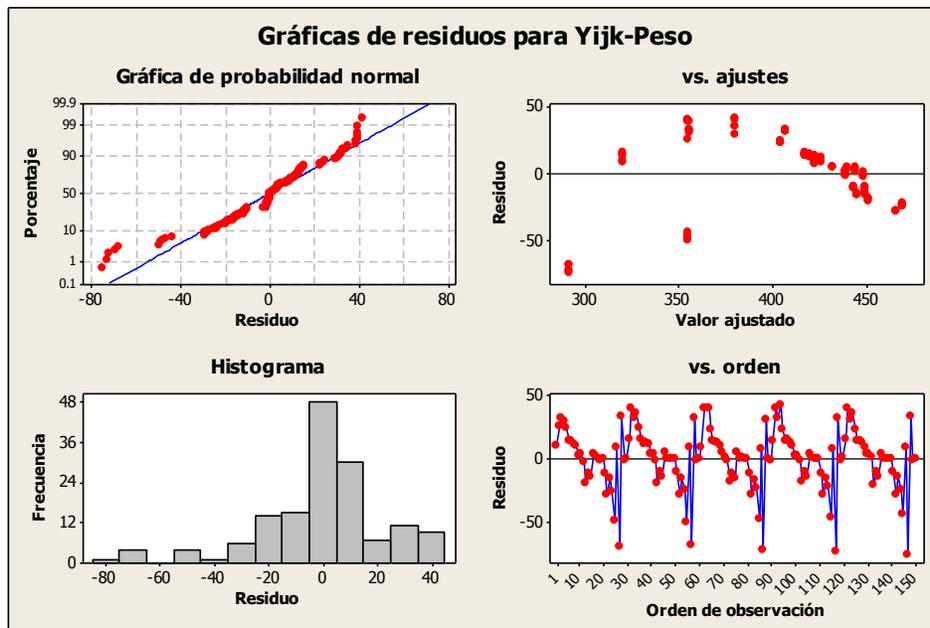
Observaciones inusuales de Yijk-Peso

Obs	OrdenEst.	Yijk-Peso	Ajuste	Ajuste SE	Residuo	Residuo estándar
25	25	306.000	354.833	8.362	-48.833	-2.12 R
27	27	223.000	292.133	8.362	-69.133	-3.00 R
55	55	305.000	354.833	8.362	-49.833	-2.17 R
57	57	224.000	292.133	8.362	-68.133	-2.96 R
85	85	307.000	354.833	8.362	-47.833	-2.08 R
87	87	220.000	292.133	8.362	-72.133	-3.13 R
115	115	308.000	354.833	8.362	-46.833	-2.04 R
117	117	219.000	292.133	8.362	-73.133	-3.18 R
147	147	217.000	292.133	8.362	-75.133	-3.27 R

R denota una observación con un residuo estandarizado grande.

El error de residuo mide la cantidad de variación en la respuesta que el modelo no pudo explicar. Si se observan valores de respuesta repetidos en ciertas configuraciones de los predictores, la variación no explicada se puede dividir en dos partes (Falta de ajuste y error puro).

A continuación se presentan las siguientes gráficas para visualizar los efectos de los datos (Grafica 25). Muestra cuatro gráficas distintas; este diseño puede ser útil para comparar las gráficas a fin de determinar si su modelo cumple con los supuestos del análisis. Las gráficas de residuos incluidas en el diseño cuatro en uno son:



Grafica 25. Graficas de Residuos para Yijk-Peso - DCC.

La gráfica de probabilidad normal de residuos sigue aproximadamente una línea recta de los datos “Yijk-Peso”. Por lo que no existe evidencia de que los datos no sean normales, pero sí de valores atípicos o variables no identificadas y sesgo.

Este patrón...	Indica...
No una línea recta	No normalidad
Curva en las colas	Sesgo
Un punto alejado de la línea	Un valor atípico
Cambio de pendiente	Una variable no identificada

Tabla 33. Patrones para la gráfica de probabilidad normal de residuos.

El histograma de residuos muestra la distribución de todas las observaciones. Los residuos forman aproximadamente una campana. Se observa que tiene un sesgo de la parte izquierda ya que se extiende más que la derecha, es decir, falta de simetría. La gráfica “orden” representa los residuos en el orden de las observaciones correspondientes. Muestra que existe correlación entre los términos de error cercanos entre sí, ya que se observa una tendencia ascendente y descendente en los residuos.