

# UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



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

ANÁLISIS DE UN PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN  
DE FORMADO DE FOAM EN UNA EMPRESA  
MAQUILADORA DE ARNESES DE HERMOSILLO, SONORA

# T E S I S

PRESENTADA POR

**SARAHÍ DE LA TORRE CINCO**

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

DIRECTOR DE TESIS  
M.C. CARLOS ANAYA EREDIAS

CODIRECTOR  
M.C. GUILLERMO CUAMEA CRUZ

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

SEPTIEMBRE 2018

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



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



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



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

Hermosillo, Sonora a 7 de agosto de 2018

## SARAHÍ DE LA TORRE CINCO

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado vigente, otorgamos a usted nuestra aprobación de la fase escrita del examen de grado, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestra en Ingeniería.

Por tal motivo este jurado extiende su autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **ANÁLISIS DE UN PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN DE FORMADO DE FOAM EN UNA EMPRESA MAQUILADORA DE ARNESES DE HERMOSILLO, SONORA** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE

M.C. Carlos Anaya Eredias  
Director de tesis y Presidente del jurado

M.C. Guillermo Cuamea Cruz  
Codirector y Vocal del Jurado

Dr. Jaime Alfonso León Duarte  
Secretario del Jurado

Dr. Jaime Olea Miranda  
Vocal del Jurado

Ciudad Juárez, Chihuahua, México, a 17 de julio de 2018

## SARAHÍ DE LA TORRE CINCO


Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado de la Universidad de Sonora, otorgo a usted mi aprobación de la fase escrita del examen profesional, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestra en Ingeniería.

Por tal motivo, como sinodal externo y vocal del jurado, extiendo mi autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **ANÁLISIS DE UN PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN DE FORMADO DE FOAM EN UNA EMPRESA MAQUILADORA DE ARNESES DE HERMOSILLO, SONORA** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE



UACJ  
DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
Y MANUFACTURA

  
DR. JAVIER MOLINA SALAZAR  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ  
Sinodal Externo y Vocal del Jurado

# RESUMEN

La industria del plástico es una de las principales industrias de más rápido crecimiento en el mundo de hoy. Cada año, las cantidades de los productos plásticos utilizados es cada vez mayor. Solo en Estados Unidos, la industria de plásticos ha crecido a una tasa de 12% anual durante los últimos años, y el principal proceso de transformación de polímeros es el moldeo por inyección seguido del de extrusión.

Todos los procesos tienen una variabilidad estadística inherente que puede evaluarse por medio de métodos estadísticos. La mano de obra, las máquinas, los métodos, los materiales, y el medio ambiente presentan cada una su propia variación de tipo natural, y es la interacción de todas estas variaciones, la que determina la capacidad del proceso. El desarrollo de procedimientos adecuados para el estudio y control de los procesos productivos es fundamental para mantener un nivel óptimo de calidad en los productos. En este sentido, la Estadística juega un papel importante en todas las actividades empresariales relacionadas con la calidad pues proporciona un amplio abanico de técnicas que se pueden aplicar en el control de la misma.

En el proceso de moldeo por inyección la calidad de las piezas moldeadas se encuentra fuertemente influenciada por los parámetros y condiciones de procesamiento, por lo que en el siguiente trabajo de investigación se analizan los factores críticos que influyen en el desperdicio de material foam inyectado al arnés 225428100 (J1-MX13 DAF) a nivel experimental.

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

# ABSTRACT

The plastics industry is one of the fastest growing major industries in the world today. Every year, the quantities of plastic products used is increasing. In the United States alone, the plastics industry has grown at a rate of 12% per year over the past few years, and the main process of polymer transformation is injection molding followed by extrusion molding.

All processes have an inherent statistical variability that can be evaluated by statistical methods. Labor, machines, methods, materials, and the environment each have their own natural variation, and it is the interaction of all these variations that determines the capacity of the process. The development of adequate procedures for the study and control of the productive processes is fundamental to maintain an optimum level of quality in the products. In this sense, statistics plays an important role in all business activities related to quality because it provides a wide range of techniques that can be applied in the control of it.

In the injection molding process, the quality of the molded parts is strongly influenced by the parameters and processing conditions, so in the following research work is analyzed the critical factors that influence the waste of foam material injected into the harness 225428100 (J1-MX13 DAF) on an experimental level.

To achieve the proposed objective, the design technique of randomized complete block experiments is used based on the response surface methodology in conjunction with some quality tools such as histograms, capacity studies, control charts, among others, in addition to the use of statistical analysis techniques. The combination of these techniques was carried out in a structured and methodical way, following a conjugated plan of stages, ranging from the planning prior to the experiment to the analysis of the results obtained and the definition of optimal values of each parameter for the molding process. injection.

## **DEDICATORIAS**

A mi madre, Martha Cecilia Cinco Fimbres, quien me ha brindado su apoyo incondicional durante estos 28 años. Gracias por todos los sacrificios que has hecho por mí, por la educación que me ofreciste y por haber hecho de mí una persona honesta y responsable. A mi padre, Florencio De la Torre Salcido, por haberme dado los estudios necesarios para que pudiera salir adelante. A ustedes que me ayudaron a comprender que hay tiempo para realizar cualquier actividad, que los objetivos se pueden lograr si se hacen con dedicación y por haberme inculcado que la base del éxito está en el estudio. Son mis grandes ejemplos de vida y a quienes admiraré por siempre.

A mis hermanos Astrid De la Torre Cinco, Alan Florencio De la Torre Cinco y mi tía Carmen Irene Cinco Fimbres., por los agradables momentos que hemos pasado, por su amor y comprensión. Por sus buenos ejemplos y sus consejos que me han ayudado a salir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director de tesis, M.C. Carlos Anaya Eredias por haberme brindado su apoyo y asesoría siempre que lo requería, por haberme aceptado como su tesista. Gracias por haberme ayudado y guiarme en mi proyecto, por todas las veces que estuvo presente en la empresa, su paciencia y por todo ese tiempo que me dedicó incluso estando fuera de su horario de trabajo.

A mis maestros, que me guiaron y me apoyaron con sus consejos para salir adelante en la maestría. Gracias por haberme dado las herramientas de aprendizaje que requerí para enriquecerme académicamente.

A mi novio, Oscar Vizcarra por haberme fortalecido en los momentos difíciles, por todos tus consejos, tu paciencia y brindarme apoyo siempre que lo necesito.

Al Ingeniero Martin Alberto Gradillas León quien me dio la oportunidad de desarrollar el proyecto en la empresa y me proporcionó los recursos necesarios para realizar la investigación, por dedicarnos tiempo a mi director y a mí de asesorarnos; y al equipo de moldeo de foam por su tiempo invertido en el proyecto y por atendernos siempre con la mejor disposición. Al Ingeniero Alejandro Martínez por brindarme de su tiempo, sus conocimientos y experiencias en el área. A los Ingenieros Mario Ernesto Rivera Posada, Mayra Cecilia Valenzuela Meza, Grecia Rodríguez García, Jesús Gámez García por apoyarme y haberme hecho crecer laboralmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Fortalecimiento de la Calidad Educativa (PFCE) por su apoyo económico.



# ÍNDICE DE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
DEDICATORIAS .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
ÍNDICE DE GENERAL .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Presentación .....	2
Planteamiento del problema .....	3
Objetivo General .....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis .....	3
Alcances y delimitaciones .....	4
Justificación.....	4
2. MARCO DE REFERENCIA .....	5
2.1. Moldeo por inyección.....	5
2.2. Máquinas de inyección .....	6
2.3. Calidad en los productos .....	13
2.4. Parámetros que influyen en el proceso de moldeo por inyección .....	14
2.5. Comportamiento del material dentro del molde .....	14
2.6. Problemas en el moldeo por inyección .....	14
2.7. Herramientas de la calidad .....	15
2.8. Carta de control .....	16
2.9. Capacidad de proceso.....	17
2.10. Diseño de experimentos .....	19
2.11. Almacén y logística.....	27
2.12. Análisis de estudios previos .....	30

3.	METODOLOGÍA.....	32
3.1	Fase 1: Almacén de materiales .....	32
3.2	Fase 2: Análisis de mezcla .....	33
3.3	Fase 3: Condiciones de la máquina.....	35
3.4	Fase 4: Molde externo .....	37
3.5	Fase 5: Evaluación .....	39
4.	IMPLEMENTACIÓN .....	40
4.1	Fase 1: Almacén de materiales .....	40
4.2	Fase 2: Análisis de mezcla .....	42
4.3	Fase 3: Condiciones de la máquina.....	48
4.4	Fase 4: Molde externo .....	49
4.5	Fase 5: Evaluación .....	58
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	59
5.1	Conclusiones.....	59
5.2	Recomendaciones.....	60
5.3	Trabajos futuros.....	60
6.	REFERENCIAS .....	61
7.	ANEXOS .....	67

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Máquina de inyección de plástico.....	7
<b>Figura 2.2.</b> Unidad de cierre de la máquina de inyección .....	7
<b>Figura 2.3.</b> Unidad de inyección .....	8
<b>Figura 2.4.</b> Circuito de presión de unidad de potencia .....	8
<b>Figura 2.5.</b> Elementos esenciales de una unidad de inyección.....	9
<b>Figura 2.6.</b> Máquina de moldeo Hennecke .....	11
<b>Figura 2.7.</b> Comportamiento del material dentro del molde .....	15
<b>Figura 2.8.</b> Gráfica de contorno de una superficie de respuesta.....	26
<b>Figura 2.9.</b> Forma general del modelo de primer orden y segundo orden.....	26
<b>Figura 2.10.</b> Ejemplo básico VSM .....	30
<b>Figura 3.1.</b> Diagrama de metodología aplicado en proceso de inyección foam .....	32
<b>Figura 3.2.</b> Secuencia de la prueba de almacén de material .....	34
<b>Figura 3.3.</b> Metodología para realizar un diseño de experimentos.....	38
<b>Figura 4.1.</b> Tambos de material.....	40
<b>Figura 4.2.</b> Termostato del área de foam.....	40
<b>Figura 4.3.</b> Equipo de protección personal para manejo de material foam .....	43
<b>Figura 4.4.</b> Equipo de uso de pruebas para material foam .....	43
<b>Figura 4.5.</b> Equipo de mezclado del material.....	44
<b>Figura 4.6.</b> Mezcla en el "tubo Greiner" .....	44
<b>Figura 4.7.</b> Reacción del material .....	45
<b>Figura 4.8.</b> Gráfico de densidad actual .....	46
<b>Figura 4.9.</b> Capacidad del proceso real .....	46
<b>Figura 4.10.</b> Gráficas $\bar{x}$ -S de la densidad foam diaria .....	47
<b>Figura 4.11.</b> Capacidad del proceso propuesto .....	47
<b>Figura 4.12.</b> Material en contenedores de suministro de la máquina .....	48
<b>Figura 4.13.</b> Pantalla de control de parámetros del proceso.....	49
<b>Figura 4.14.</b> Preparación del arnés e Inyección de foam.....	50
<b>Figura 4.15.</b> Derrame de material en punto de inyección .....	51
<b>Figura 4.16.</b> Retiro del arnés .....	51
<b>Figura 4.17.</b> Retrabajo del arnés .....	52

<b>Figura 4.18.</b> Peso de muestras réplicas .....	53
<b>Figura 4.19.</b> Grafica de probabilidad normal de tiempo .....	56
<b>Figura 4.20.</b> Gráfico de Fisher del tiempo.....	56
<b>Figura 4.21.</b> Gráfico de medias de Fisher de la temperatura .....	57
<b>Figura 4.22.</b> Gráfico de medias de Fisher de la densidad.....	57
<b>Figura 7.1.</b> Anexo de tabla de densidades #1 .....	67
<b>Figura 7.2.</b> Anexo de tabla de densidades #2 .....	67
<b>Figura 7.3.</b> Anexo de tabla de densidades #3 .....	68
<b>Figura 7.4.</b> Anexo de tabla de densidades #4 .....	68
<b>Figura 7.5.</b> Anexo de tabla de densidades #5 .....	69
<b>Figura 7.6.</b> Anexo de tabla de densidades #6 .....	69
<b>Figura 7.7.</b> Anexo de tabla de densidades #7 .....	70
<b>Figura 7.8.</b> Anexo de tabla de densidades #8 .....	70
<b>Figura 7.9.</b> Anexo de tabla de densidades #9 .....	71
<b>Figura 7.10.</b> Anexo de tabla de densidades #10.....	71

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Tipos de máquinas para el moldeo por inyección de plásticos .....	11
<b>Tabla 2.2.</b> Constantes para los límites de control de los gráficos $\bar{x}$ -S y $\bar{x}$ -R .....	17
<b>Tabla 2.3.</b> Análisis de varianza de bloques aleatorizados con réplicas .....	24
<b>Tabla 4.1.</b> Inspección de recibo de Polyol.....	41
<b>Tabla 4.2.</b> Inspección de recibo de Isocyanate .....	42
<b>Tabla 4.3.</b> Réplica 1 de experimento con la variable de respuesta .....	54
<b>Tabla 4.4.</b> Réplica 2 de experimento con la variable de respuesta .....	54
<b>Tabla 4.5.</b> Análisis de varianza .....	55

# 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de procedimientos adecuados para el estudio y control de los procesos productivos es fundamental para mantener un nivel óptimo de calidad en los productos. En este sentido, la Estadística juega un papel importante en todas las actividades empresariales relacionadas con la calidad pues proporciona un amplio abanico de técnicas que se pueden aplicar en el control de la misma (Huerga et al., 2005).

Según Navarrete (1998) la expresión "control de la calidad" puede tener distintos enfoques se puede definir como el conjunto de las actividades técnicas y administrativas mediante el cual se miden las características de calidad de un producto, se compararán con especificaciones o requisitos y se toman acciones correctivas cuando exista una discrepancia entre el funcionamiento real y el estándar. Generalmente estas características suelen ser medibles, lo que hace posible su evaluación y control. En otras palabras, las características de calidad son, en realidad, variables aleatorias y se describen por una determinada distribución de probabilidad. Este hecho, junto con la variabilidad que se presenta en los procesos productivos justifica la necesidad de utilizar la Estadística en el control de la calidad (Huerga et al., 2005).

Existen arneses electrónicos que por la naturaleza de su función dentro del automóvil requieren de un recubrimiento de espuma (foam), el cual debe cumplir con las especificaciones estéticas, es decir evitar burbujas, conectores con espuma, fugas, etc., pero lo más importante es que no se dañe el arnés mientras pasa por dicho proceso de moldeo generando cables y terminales dañadas, así como mostrando no continuidad en los ramales o el arnés en su totalidad.

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

## Presentación

La empresa donde se va a realizar el proyecto es LEONI Wiring Systems, situada en Hermosillo, Sonora, México; se dedica a fabricar sistemas de cableado para una variedad de industrias, incluyendo, vehículos automotores, comerciales, el sector de la salud, comunicaciones, infraestructura, y electrodomésticos.

El área de foam es el encargado de moldear plástico sobre el arnés que brinda mayor protección al producto según este lo requiera por diseño y especificación del cliente. El proceso consiste en tres etapas independientes entre sí; la primera es la mezcla de dos materiales, Polyol (POLY) e Isocyanate (ISO), los cuales se retienen en contenedores para después pasar a ser suministrados a la máquina, la segunda etapa es la máquina móvil que se encarga de abastecer a diferentes moldes fijos; por último, la tercera etapa consiste en una serie de moldes fijos los cuales, después de ser inyectados con la mezcla, pasan a esperar que el foam se solidifique sobre el arnés para después ser removido del molde.

Uno de los principales problemas del área es la falta de control que se tienen de los componentes para formar la mezcla de plástico, ya que al no tener asignado un lugar en el área donde se almacenan, se mezclan los lotes viejos de material (Polyol e Isocyanate) con el material nuevo, las variabilidades de las pruebas cambian según los lotes y se cree que afecta en el rendimiento del plástico. El constante exceso de material que se filtra entre el tooling del molde y el punto de inyección provoca retrabajos en un 95% de los arneses que entran al proceso, lo cual significa pérdida del material inyectado; así mismo es un defecto que los clientes internos de la empresa reportan constantemente.

También se presentan otra variedad de defectos que no son posibles de retrabajar, tales como burbujas, tiros cortos, contaminación de agua, cable dañado, venteos tapados y exceso de cera; los cuales provocan pérdidas desde \$40 a \$600 dólares según sea el tipo de arnés. El control de los parámetros dentro de un rango de tolerancia es sumamente importante y la variabilidad de estos interfieren directamente en la calidad del producto final; como la moldeadora alimenta varios tipos de moldes simultáneamente, se tiene un mismo rango de parámetros para todos, como lo son el tiempo, la presión y la densidad. A su vez, los operadores reportan problemas con el

retiro del arnés con foam, según el periodo de tiempo de espera (parámetro que también se debe de considerar como valor de respuesta) que se deje sobre el molde. En la etapa de secado se presentan problemas de retiro del arnés, ya que el material puede presentar viscosidad, adhesión al molde etc.

## **Planteamiento del problema**

En el área de moldeo de foam se han reportado pérdidas de material en el proceso de inyección y quejas de los clientes por exceso de plástico sobre el arnés, los cuales son considerados fuera de especificación por estética y funcionalidad.

No se cuentan con los valores justos de los parámetros que afectan directamente a la producción y que originan los problemas de calidad en la inyección final del proceso. La mayoría del foam moldeado sobre el arnés presenta flash, o en su defecto, exceso de material que sobrepasa el máximo permitido de 3 milímetros, ocasionando aumento del tiempo de entrega por retrabajo y aumento de costos de producción.

## **Objetivo General**

Determinar los valores más adecuados de los parámetros de la máquina y el material mediante el uso de análisis de diseño experimental para mejorar la eficiencia de un proceso de moldeo de arneses electrónicos y reducir el material desperdiciado.

## **Objetivos específicos**

1. Determinar el estado de mezcla más adecuado entre los componentes Polyol e Isocyanate.
2. Identificar, definir y medir los parámetros que afectan al proceso productivo final de inyección de foam de arnés 225428100 para reducir el flash y material desperdiciado del punto de inyección.
3. Monitorear la efectividad de los cambios de parámetros en el proceso de la etapa de inyección final.

## **Hipótesis**

Por medio de la identificación y control de los factores que influyen en el proceso productivo, se reducirán los desperdicios de material de foam moldeado y se mejorará



el retiro del arnés después del tiempo de secado, sin que se afecte la calidad del producto final con base en la utilización de análisis de diseño experimental.

## **Alcances y delimitaciones**

El proyecto se enfocará únicamente del arnés 225428100 ya que es el que presenta mayor variabilidad en el proceso, desperdicio de material en el punto de inyección y flash que provoca que el proceso desperdicie mucho material.

El área de foam en la empresa ha establecido que el parámetro de presión de la maquina no sería posible de manipular por motivos de producción, ya que esto provoca que se vean afectados otros productos que también se les suministra el material en la misma línea de inyección del mismo cabezal de la máquina.

## **Justificación**

Los beneficios que proporciona este proyecto serán reducir los defectos que se presentan en el foam moldeado sobre el arnés, mediante la identificación, estandarización y control de los principales parámetros que intervienen en la calidad del producto, para así evitar los rechazos de clientes, ayudar a que se reduzcan los desperdicios y el retrabajo los cuales no agregan valor y generan pérdidas monetarias para la empresa.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

La industria del plástico es una de las principales industrias de más rápido crecimiento en el mundo de hoy. Cada año, las cantidades de los productos plásticos utilizados es cada vez mayor (Hussin et al., 2013). Según Cuahuizo (2007), sólo en Estados Unidos, la industria de plásticos ha crecido a una tasa de 12% anual durante los últimos años, y el principal proceso de transformación de polímeros es el moldeo por inyección seguido del de extrusión.

### **2.1. Moldeo por inyección**

El moldeo por inyección es un proceso semicontinuo que consiste en inyectar un polímero en estado fundido (o ahumado) en un molde cerrado a presión y frío, a través de un orificio pequeño llamado compuerta. En ese molde el material se solidifica, la pieza o parte final se obtiene al abrir el molde y sacar la cavidad de la pieza moldeada. (Cuahuizo et al., 2007).

Se dice que es una de las técnicas más importantes para el procesamiento de polímeros (para la fabricación de productos plásticos) debido a su alta velocidad de producción y la capacidad de fabricar formas geométricas complejas. Además, el moldeo por inyección es capaz de producir en masa, por lo que es ampliamente utilizado para muchos productos, especialmente para electrónicos, como computadoras y de comunicación (Chen et al., 2013).

A este proceso se le considera el más importante para manufacturar partes plásticas debido a la facilidad de fabricación de artículos de alta calidad (Shuaib et al., 2012), además, tiene algunas ventajas como alta estabilidad dimensional, ciclos cortos de producción, superficies finas y limpias en los productos, moldeo fácil de formas complicadas, así como bajos costos en la producción (Kurt et al., 2009). Por lo tanto, este tipo de moldeo es un proceso ampliamente utilizado en las organizaciones industriales (Ming-Tsan et al., 2009). Además, permite la fabricación de una gran variedad de formas, desde las más sencillas y complejas como las tridimensionales (3-D), hasta piezas extremadamente pequeñas y muy grandes. Cuando es necesario, estos productos pueden ser moldeados con tolerancias muy pequeñas, precisas y con peso físico de fracciones de un gramo (Rosato et al., 2000).

Ejemplos de piezas moldeadas por inyección se pueden encontrar en cualquier parte de la vida cotidiana, e incluye juguetes, piezas de automóviles, artículos del hogar, aparatos electrónicos, entre otros (Stanek et al., 2011).

### **2.1.1. Ciclo de inyección**

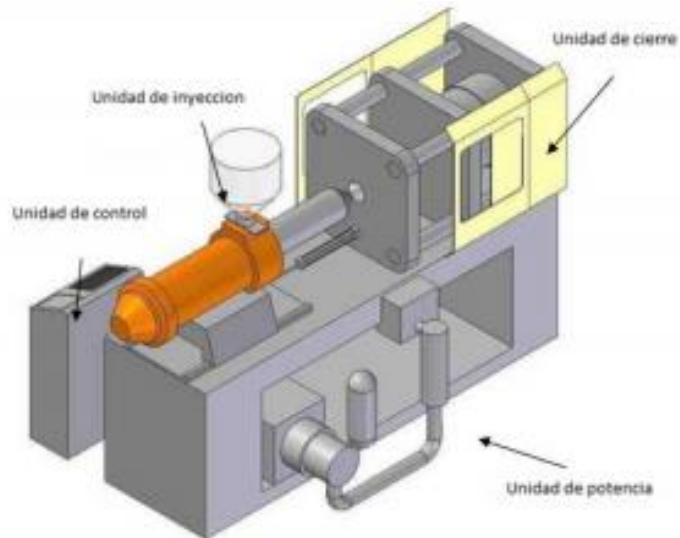
El ciclo del proceso de inyección tiene cuatro etapas principales:

- 1) El calentamiento del termoplástico
- 2) La entrada de material polimérico en el molde
- 3) La transferencia de calor o refrigeración
- 4) El desmoldeo de la pieza.

Las propiedades de calidad de los moldes determinan la productividad del proceso, ya que la tasa de producción, es decir el tiempo del ciclo, dependerá de la rapidez con que el material puede ser calentado, inyectado, solidificado y expulsado. Entre estas etapas, la de enfriamiento es la que demanda mayor tiempo, así es fundamental tener un buen proyecto del sistema no sólo para reducir el tiempo de ciclo de proceso, sino también para mejorar la calidad del producto (Hassan et al., 2009), que puede ser clasificada como calidad externa: dimensión, forma, propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas y calidad interna: tensión de cizallamiento, peso y orientación molecular y grado de cristalización (Wong et al., 2008). Un incorrecto enfriamiento puede llevar a deformaciones conocidas como rechupes e indeseables tensiones residuales (Hassan et al., 2010).

## **2.2. Máquinas de inyección**

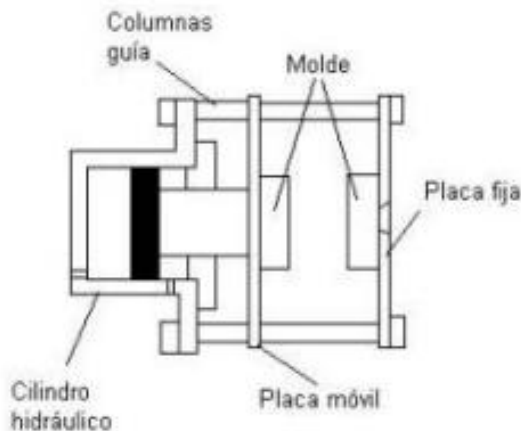
La máquina de inyección de plástico actúa en un proceso continuo que consiste en inyectar un plástico fundido en un molde cerrado a presión y frío, a través de una boquilla. En el moldeo el material se solidifica y posteriormente el molde se abre y la pieza moldeada se expulsa (Diaz, E. et al., 2011).



**Figura 2.1.** Máquina de inyección de plástico (Díaz, E. et al., 2011).

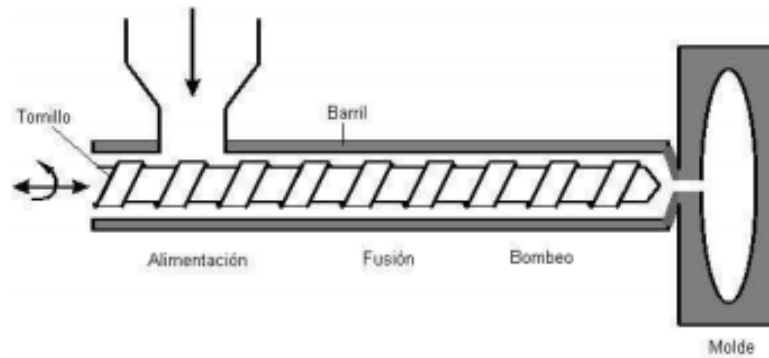
Una inyectora se compone de cuatro unidades principales (Figura 2.1):

- a) Unidad de cierre: Consta de los dispositivos necesarios para la colocación, accionamiento y funcionamiento de las dos mitades del molde. Sus principales partes son las platinas porta-moldes fijas y móviles y el mecanismo de apertura y cierre del molde (Ver figura 2.2).



**Figura 2.2.** Unidad de cierre de la máquina de inyección (Díaz, E. et al., 2011).

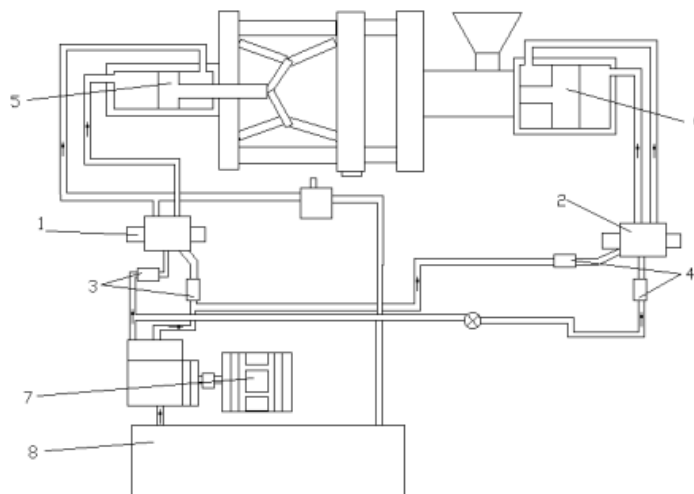
- b) Unidad de inyección: Comprende las partes necesarias de la máquina para la carga, plastificación e inyección del plástico (Ver figura 2.3.)



**Figura 2.3.** Unidad de inyección (Díaz, E. et al., 2011).

c) Unidad de potencia: Comprende el conjunto de dispositivos necesarios de la máquina para transformar y suministrar la fuerza motriz a las unidades de inyección y de cierre. En la figura 2.4. se pueden observar los siguientes elementos (Díaz, E. et al., 2011):

1. Válvula de cuatro vías del molde
2. Válvula de cuatro vías del tornillo
3. Válvulas reguladoras de presión del molde
4. Válvulas reguladoras de presión del tornillo
5. Pistón de cierre y apertura de molde
6. Tornillo de inyección
7. Bomba
8. Depósito de aceite



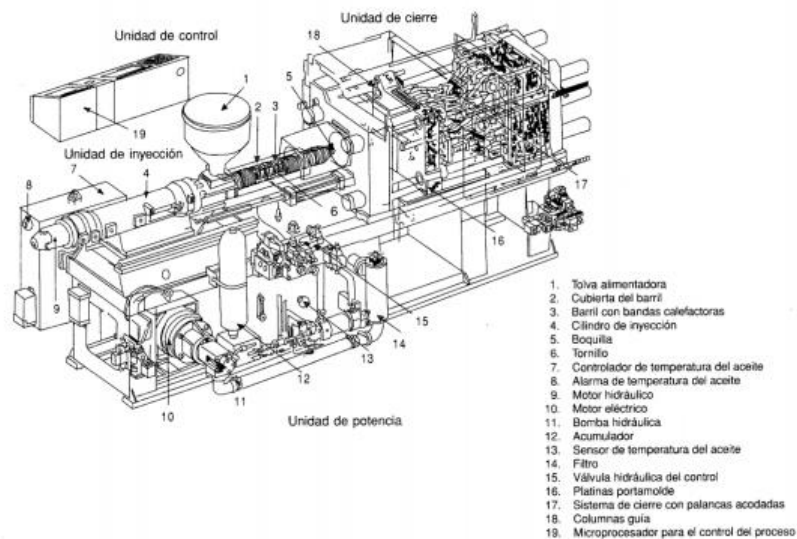
**Figura 2.4.** Circuito de presión de unidad de potencia (Díaz, E. et al., 2011).

d) Unidad de control: es la parte necesaria de la máquina para que realice el proceso de una forma predeterminada y pueda variarse a voluntad. El sistema de control está ligado al de potencia, a través del cual las distintas señales se convierten en movimientos de las unidades de inyección y cierre. (Sánchez, 2002).

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

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

Las unidades de moldeo constan de las dos partes del molde sujetas mediante piezas porta-moldes y ciertos mecanismos, generalmente hidráulicos, que tienen por misión su abertura y cierre. Estos mecanismos tienen que ser suficientemente robustos para resistir la presión del material en la etapa final de la inyección, que puede superar los 50 MPa y llegar a los 200 MPa (Sánchez, 2002). En la figura 2.5. se muestran los componentes de una máquina inyectora de plástico.



**Figura 2.5.** Elementos esenciales de una unidad de inyección (Sánchez, 2002).

### 2.2.2. Tipo de máquinas de inyección

Existen diferentes tipos de máquinas para el moldeo por inyección de plásticos. En la tabla 2.1. se enlistan las más comunes.

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

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

**Tabla 2.1.** Tipos de máquinas para el moldeo por inyección de plásticos (Sánchez, 2002).

En el proyecto de tesis se estará trabajando con una máquina giratoria de inyección de espumas rígidas y reactivas llamada Hennecke. Es de origen alemán y fue comprada por la empresa hace 10 años. En la figura 2.6. se muestra una imagen de la máquina inyectora utilizada por la empresa.



**Figura 2.6.** Máquina de moldeo Hennecke



### **2.2.3. Mantenimiento / Calibración**

Los Sistemas de Gestión de Mantenimiento son un asunto relevante en las organizaciones que aplican estrategias de tipo Lean Manufacturing. Para que estos sistemas funcionen adecuadamente, es importante que las personas vinculadas se encuentren comprometidas, sin embargo, a menudo es difícil alcanzar el nivel de acuerdo necesario. Hay al menos dos cuestiones básicas que deben establecerse en conjunto: por un lado, la definición de prioridades en la atención de modos de falla y por el otro, la selección de estrategias de mantenimiento adecuadas para cada equipo. (Dimitroff, M., et al. 2016).

Entre las cuestiones que se deben analizar en la actividad productiva, se encuentra la adopción y gestión de adecuados sistemas de mantenimiento de los medios o activos necesarios para la producción (Manzini et al., 2009). Un requerimiento para estos sistemas es la determinación de niveles de criticidad que permitan ordenar el desarrollo de los mismos y establecer prioridades para la aplicación de acciones (Rausand, 1998; Chopra et al., 2016). Además, es importante la identificación de la estrategia de mantenimiento más adecuada para cada recurso (Arunraj & Maiti, 2010).

Estudios realizados indican que el efectuarse el mantenimiento técnico en el tiempo establecido y todas las operaciones previstas, el flujo de fallos de las máquinas disminuye en un 50%, en condiciones medias de explotación, lo cual posibilita la reducción de los gastos por conceptos de reparaciones y a la vez mano de obra (Miranda et al., 2003).

En cuanto a la calibración, la podemos definir como: “la comparación de un estándar de medición, o de un equipo, con un estándar o equipo de mayor exactitud, para detectar y cuantificar imprecisiones y reportarlas o eliminarlas mediante un ajuste” (EPA, 2008). En este sentido, la calibración es la actividad de control de calidad más importante dentro de la medición, ya que establece la relación del valor medido por un equipo con un valor convencionalmente real, dando validez y trazabilidad a la medición. Cada equipo debe calibrarse apegándose a las condiciones de operación, conforme a procedimientos basados tanto en las instrucciones específicas del manual

de operación del equipo, como en las directrices generales provistas por los métodos normalizados (Normas Oficiales Mexicanas para la medición de contaminantes).

El objetivo de la calibración es mantener y verificar el buen funcionamiento de los equipos, responder los requisitos establecidos en las normas de calidad y garantizar la fiabilidad y la trazabilidad de las medidas. Los instrumentos de medida requieren ser calibrados con más frecuencia cuanto más exactas sean sus muestras o bien más pequeñas sean sus propias tolerancias de error. En general, los intervalos de calibración dependen de factores como los requerimientos dados por un cliente o una regulación y la estabilidad con el tiempo del instrumento a calibrar (EPA, 2008).

### **2.3. Calidad en los productos**

Para la fabricación de productos con altos estándares de calidad, considerando los grandes niveles de producción a gran escala que se presentan en la actualidad, es necesario investigar y desarrollar nuevas tecnologías que permitan aumentar la producción y al mismo tiempo aseguren la calidad y la homogeneidad de un producto. El control de calidad surge como una necesidad global en la industria para desarrollar productos que cumplan altos estándares de precisión y desempeño. Algunas empresas del sector industrial involucran complejos procesos de calidad que demandan gran cantidad de recursos humanos y económicos; estos representan un costo que las empresas tienen que asumir y por lo tanto desempeñan un papel importante en el precio final de un producto (Pérez, 2010; Peña, 2007).

Junto con el rápido progreso de las técnicas de producción de productos de alta tecnología, se requiere una mejor calidad de los productos para la supervivencia en el mercado actual. Además de proporcionar diversas funciones, la tendencia del diseño de productos de plástico es ligero, delgado, corto y pequeño. Por lo tanto, el establecimiento de parámetros de proceso para los productos de plástico tiene una influencia notable en su calidad (Huang y Tai 2001).

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

El moldeo por inyección es un proceso cíclico inestable, sin embargo, la selección apropiada de los parámetros para su correcta operación se hace más difícil conforme el diseño de la pieza de plástico se hace más delgada (Ko-Ta y Fu-Ping, 2006). Diversos estudios han encontrado que los parámetros que influyen durante el proceso de moldeo por inyección tienen efectos cruciales en la calidad de los productos (MingTsan et al., 2009). Algunos parámetros tales como la temperatura de inyección, temperatura del molde y el tiempo de inyección son muy importantes, ya que tienen relación directa con la calidad y el costo de los productos (Zhao et al., 2010). Otros parámetros como presión de inyección, temperatura del material fundido, velocidad de inyección y el tiempo de enfriamiento, son también variables a considerar dentro del mismo (Curic et al., 2012).

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

El flujo del polímero fundido en el moldeo por inyección resulta ser un problema muy complejo. Se trata del flujo de un líquido no newtoniano, es decir que su viscosidad puede llegar a variar seriamente con pequeñas variaciones en la velocidad del flujo, mientras más alta sea esta velocidad, provocará una disminución en la viscosidad del plástico, esto se manifiesta como una menor resistencia de flujo, además de ser compresible y que fluye a través de canales de geometría complicada, cuyas paredes están mucho más frías que el polímero. En la figura 2.7. se describen las diferentes etapas por las que pasa el material desde que entra a la cámara de plastificación hasta que se extrae la pieza del molde y del efecto de las principales variables sobre las propiedades de la pieza moldeada (Sánchez, 2002).

## **2.6. Problemas en el moldeo por inyección**

Determinar los valores óptimos de los parámetros del proceso es una tarea compleja y difícil. Los defectos de los productos, tales como deformaciones, encogimiento, marcas de hundimiento, y la tensión residual, son causados por diversos factores durante el proceso de producción. Estos defectos influyen en la calidad y la precisión

de los productos. Por lo tanto, es de suma importancia controlar eficazmente la influencia de los factores durante el proceso de moldeo (Curic et al., 2012).



Figura 2.7. Comportamiento del material dentro del molde (Sánchez, 2002).

## 2.7. Herramientas de la calidad

Según Pérez y Parra (2007), la evaluación y análisis de la calidad es el primer paso para avanzar hacia la confiabilidad, entendida ésta en una forma práctica, como la calidad a través del tiempo (Escobar et al., 2003, p. 5-6). En este sentido, la medición de la calidad resulta de vital importancia, pudiendo considerarse como la comparación

entre la calidad real y la calidad propuesta o esperada, cuando la primera es superada por la segunda, su mejora pasa por actuar sobre dicha diferencia. Dentro de las medidas de calidad que utilizan las empresas pueden establecerse dos grupos: internas y externas (Bolton y Drew, 1994). Las primeras son utilizadas tradicionalmente por las propias empresas para valorar la calidad y consisten en la comprobación del cumplimiento de ciertos estándares prefijados.

Dentro de las medidas internas de la calidad se puede encuadrar el grupo de técnicas relativas al Control Estadístico (Price, 1984; Deming, 1989). Éstas se basan en la comparación del diseño del servicio con su posterior concreción, enfocándose más en el proceso que en las salidas, que son difícilmente inspeccionables en muchos servicios. Las principales herramientas de Control Estadístico aplicables a los bienes intangibles son: el diagrama de flujo de servicio, los gráficos de control de proceso, el diagrama causa-efecto, el diagrama de Pareto, etc. (Rosander, 1992).

## **2.8. Carta de control**

En cualquier proceso de fabricación no siempre se producen los mismos efectos, ya que los elementos que intervienen no siempre funcionan de forma exacta, dando lugar a cierta variabilidad, cuyas causas es preciso investigar. La variabilidad de un proceso puede deberse a causas no asignables y a causas asignables. Las primeras, también llamadas aleatorias son de naturaleza probabilística y forman parte de la variación propia del proceso. Algunas de las razones por las que aparecen estas causas son: variabilidad de la materia prima, variabilidad debida a la maquinaria, distinta eficacia de la mano de obra, etc (Huerga Castro et al., 2005).

Un gráfico de control representa la evolución en el tiempo de una característica de calidad medida a partir de una muestra. En términos generales, es una representación gráfica en los ejes cartesianos, donde en el eje horizontal se indica el número de la muestra o el tiempo en que se obtiene, y en el eje vertical se indican los valores observados en las muestras. Se representan tres líneas horizontales: (Huerga Castro et al., 2005).

- Una línea central (LC), que es la norma de calidad prescrita para el proceso.
- Dos líneas horizontales llamadas límite inferior de control (LIC) y límite superior de control (LSC) que se sitúan por debajo y por encima de la LC.

### 2.8.1 Gráficos de medias y desviación estándar $\bar{x}$ -S

El funcionamiento de estos gráficos es similar al de los gráficos  $\bar{x}$ -R pero cambia el procedimiento para estimar la dispersión. Su utilización se aconseja cuando el tamaño de muestra sea superior a 10. Si se toman  $m$  muestras, para cada una se calcula  $S$  ( $\sigma$  desconocida):  $LC = \bar{s}$ ,  $LCS = B_4 \bar{s}$  &  $LIC = B_3 \bar{s}$

La media del proceso se sigue estimando mediante  $\mu$ , y siguiendo un razonamiento similar a los anteriores se obtienen las siguientes expresiones para el gráfico de control  $\bar{x}$ -S:  $LC_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}}$ ,  $LCS = \bar{\bar{x}} + A_3 \bar{s}$  &  $LIC = \bar{\bar{x}} - A_3 \bar{s}$ ; donde  $A_3$ ,  $B_3$  y  $B_4$  son valores de la tabla 2.2. que dependen de  $n$ .

	$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{X} - R$	$A_2$	1,880	1,023	0,729	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337	0,308
	$d_2$	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078
	$D_3$	0	0	0	0	0	0,076	0,136	0,184	0,223
	$D_4$	3,267	2,574	2,282	2,114	2,004	1,924	1,864	1,816	1,777
$\bar{X} - S$	$A_3$	2,659	1,954	1,628	1,427	1,287	1,182	1,099	1,032	0,975
	$c_4$	0,7979	0,8862	0,9213	0,94	0,9515	0,9594	0,965	0,9693	0,9727
	$B_3$	0	0	0	0	0,03	0,118	0,185	0,239	0,284
	$B_4$	3,267	2,568	2,266	2,089	1,97	1,882	1,815	1,761	1,716

**Tabla 2.2.** Constantes para los límites de control de los gráficos  $\bar{x}$ -S y  $\bar{x}$ -R

## 2.9. Capacidad de proceso

El Control Estadístico de Procesos es una herramienta que permite mantener un proceso productivo dentro de límites aceptables, para lograr productos que cumplan con las especificaciones requeridas, pudiendo incluso disminuir costos de producción. Sin embargo, la implantación del control estadístico de procesos requiere de la definición de las variables críticas de entrada y salida, conocidas como parámetros clave de operación e indicadores clave del proceso, respectivamente, siendo las primeras las variables que hay que controlar para cumplir con las especificaciones de las segundas (Lara-Hernández et al., 2011).

Por otra parte, Mosquera-Artamonov (2014) comenta que, todos los procesos tienen una variabilidad estadística inherente que puede evaluarse por medio de métodos estadísticos. La mano de obra, las máquinas, los métodos, los materiales, y el medio ambiente presentan cada una su propia variación de tipo natural, y es la interacción de todas estas variaciones, la que determina la capacidad del proceso.

La capacidad del proceso es una propiedad medible que puede calcularse por medio del índice de capacidad del proceso o del índice de prestación del proceso. El resultado de esta medición suele representarse con un histograma que permite calcular cuántos componentes serán producidos fuera de los límites establecidos en la especificación. Según Montgomery (2005), la capacidad del proceso representa el desempeño del mismo siempre y cuando éste se encuentre dentro de control estadístico. La capacidad del proceso es una medida de la variabilidad total del proceso siempre y cuando dicha variabilidad se deba a causas no asignables. La dispersión del proceso  $6\sigma$  generalmente se toma como una medida de la capacidad, ya que el 99.74% de todos los productos o medidas observadas se encuentran dentro de ese margen.

### 2.9.1. Índices de capacidad de proceso

Estos índices relacionan la dispersión del proceso con la dispersión especificada de la siguiente forma:

$$C_P = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

siendo USL y LSL los límites superior e inferior especificados, respectivamente. Como se puede observar si el  $C_P > 1$  entonces el proceso es capaz de cumplir con los requerimientos. Sin embargo, la principal suposición del  $C_P$  es que considera la media del proceso ubicada exactamente entre el USL y el LSL, esta suposición no es una buena medida ya que en la práctica la media puede estar tendida hacia alguno de los límites. Visto de otra forma el  $C_P$  representa el potencial de proceso (Montgomery, 2005). Para considerar esta situación se tienen los índices superior e inferior de capacidad ( $C_{PU}$  y  $C_{PL}$ ), los cuales se definen de la siguiente forma:

$$C_{PU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (2)$$

$$C_{PL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (3)$$

Debido a lo anterior es conveniente definir un nuevo índice que tome en cuenta la media del proceso. Este nuevo índice se define a partir del  $C_{PU}$  y el  $C_{PL}$ , los cuales consideran la media del proceso. Este índice es conocido como  $C_{PK}$  y se define de la siguiente forma (Montgomery, 2005):

$$C_{PK} = \min(C_{PU}, C_{PL}) \quad (4)$$

Ahora bien, de acuerdo con las ecuaciones (1) y (4) se tiene si  $C_P = C_{PK}$  entonces el proceso está centrado respecto a sus especificaciones, mientras que si  $C_{PK} < C_P$  la media del proceso tiende hacia algunos de los límites especificados. El  $C_{PK}$  es útil para determinar si el proceso está dentro de los límites de control estadístico, es decir, si los métodos, máquinas, materiales, herramientas y mano de obra, están operando de acuerdo con las necesidades del cliente.

## 2.10. Diseño de experimentos

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

A estos métodos estadísticos se les conoce también como estrategias de mejora, las cuales son utilizadas para encontrar los componentes de variación y sus causas, a partir de un problema específico en la realización de un proceso. Por lo que una estrategia de mejora puede ser definida como “un conjunto coherente de medidas destinadas a mejorar el rendimiento de un proceso de identificación de las causas de la variación y la generación de acciones de mejora” (Mast et al., 2000). Tener variabilidad en el proceso de producción es inevitable debido a la inconsistencia en los parámetros de la máquina, la pieza de trabajo, materiales y procesos (Jeang, 1999). Cuando existe variación en el proceso, el Diseño de Experimentos es una técnica estadística utilizada para determinar el ajuste óptimo de los factores que



afectan al proceso, y de esta manera mejorar su funcionamiento, reducir su variabilidad y mejorar la manufactura de productos (Antony y Antony., 2001).

En la actualidad el Diseño de Experimentos es una herramienta que es utilizada para diseñar y analizar problemas complicados en procesos industriales. Es utilizado para entender las características del proceso y para investigar cómo las entradas afectan las respuestas basadas en antecedentes estadísticos, además de determinar los parámetros óptimos del proceso con un menor número de ensayos de prueba (MingTsan et al., 2009).

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

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

### **2.10.1. Diseño factorial $2^k$**

Los diseños factoriales se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. El más importante de estos casos especiales es el de  $k$  factores, cada uno solo con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos, como dos valores de temperatura, presión o tiempo, o bien cualitativos, como dos máquinas, dos

operadores, los niveles “alto” y “bajo” de un factor, o quizás la presencia o ausencia de un factor. Una réplica completa de este diseño requiere  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  observaciones y se le llama diseño factorial  $2^k$  (Montgomery, D., 2005).

El diseño  $2^k$  es de particular utilidad en las etapas iniciales del trabajo experimental, cuando probablemente se estén investigando muchos factores. Este diseño proporciona el menor número de corridas con las que pueden estudiarse  $k$  factores en un diseño factorial completo. Por consiguiente, estos diseños se usan ampliamente en la selección de factores. Puesto que sólo hay dos niveles para cada factor, se supone que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango elegido para los niveles de los factores. En muchos experimentos de tamizado de factores, cuando se acaba de iniciar el estudio del proceso o sistema, este supuesto suele ser razonable.

Montgomery (2005) dice que, los tres principios básicos del diseño de experimentos son la realización de réplicas, la aleatorización y la formación de bloques. Por la realización de réplicas se entiende la repetición del experimento básico. La realización de estas posee dos propiedades importantes. La primera, permite al experimentador obtener una estimación del error experimental. Esta estimación del error se convierte en una unidad de medición básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son en realidad estadísticamente diferentes. Segunda, si se usara la medida muestral para estimar el efecto de un factor en el experimento, la realización de réplicas permite al experimentador obtener una estimación más precisa de este efecto.

La aleatorización es la piedra angular en la que se fundamenta el uso de los métodos estadísticos en el Diseño Experimental. Por la aleatorización se entiende que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizaran las corridas o ensayos individuales del experimento se determinan al azar. Uno de los requisitos de los métodos estadísticos es que las observaciones (o los errores) sean variables aleatorias con distribuciones independientes. La aleatorización hace por lo general que este supuesto sea válido.

La formación de bloques es una técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés. Muchas veces la formación de bloques se emplea para reducir o eliminar la variabilidad

transmitida por factores perturbadores; es decir, aquellos factores que pueden influir en la respuesta experimental, pero en los que no hay un interés específico.

Existen diversos diseños  $2^k$ :

a) Diseño factorial  $2^2$ : Es el primer diseño que sólo tiene 2 factores, A y B, cada uno se corre a dos niveles. Los niveles de los factores pueden denominarse arbitrariamente “bajo” y “alto”. Las cuatro combinaciones de tratamientos suelen representarse con letras minúsculas.

b) Diseño factorial  $2^3$ : Es el diseño que tiene 3 factores; A, B y C, cada uno con dos niveles. La representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos puede hacerse con un cubo.

Para un diseño  $2^k$  el modelo completo contendría  $2^k$  combinaciones. Las combinaciones de los tratamientos pueden escribirse en orden estándar introduciendo los factores uno a la vez y combinando sucesivamente cada nuevo factor con los que lo proceden.

El enfoque general para el análisis estadístico del diseño  $2^k$  se describe de la siguiente manera:

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

Durante la realización de estos pasos se llevan a cabo cálculos como (Montgomery, D., 2005).:

- a) Estimación de efectos de los factores y examinar sus signos y magnitudes para obtener información preliminar respecto a los factores y las interacciones que pueden ser importantes.

- b) Utilización del análisis de varianza para probar formalmente la significación de los efectos principales y las interacciones.
- c) Realización del análisis residual para verificar la adecuación del modelo y los supuestos.
- d) Determinación de análisis gráfico por medio de gráficas de los efectos principales o las interacciones, superficies de respuesta y gráficas de contorno.

### 2.10.2. Diseño de bloques aleatorizados con réplicas

En cualquier experimento, la variabilidad que surge de un factor perturbador puede afectar los resultados. En general, un factor perturbador puede definirse como un factor de diseño que probablemente tenga un efecto sobre la respuesta, pero en el que no existe un interés específico. En ocasiones un factor perturbador es desconocido y no controlable; es decir, se desconoce la existencia de ese factor e incluso puede tener niveles variables mientras se está realizando el experimento. La aleatorización es la técnica de diseño que se utiliza para protegerse contra estos factores perturbadores, en otras ocasiones el factor perturbador es conocido, pero no controlable.

El modelo estadístico utilizado para bloques aleatorizados con réplicas es el siguiente (Montgomery, 2005):

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + \beta_k + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, p \\ k = 1, 2, \dots, b \end{cases} \quad (5)$$

Donde  $y_{ijk}$  es la observación en el renglón  $i$ -ésimo y la columna  $k$ -ésima para el tratamiento  $j$ -ésimo,  $\mu$  es la media global,  $\alpha_i$  es el efecto del renglón  $i$ -ésimo,  $\tau_j$  es el efecto del tratamiento  $j$ -ésimo,  $\beta_k$  es el efecto de la columna  $k$ -ésima, y  $\varepsilon_{ijk}$  es el error aleatorio.

El análisis de varianza consiste en hacer la partición de la suma de cuadrados total de la  $N=abp$  observaciones en los componentes de los renglones, las columnas, los tratamientos y el error:

$$SS_T = SS_{\text{Renglones}} + SS_{\text{Columnas}} + SS_{\text{Tratamientos}} + SS_E \quad (6)$$

Bajo el supuesto usual de que  $\varepsilon_{ijk}$  es NID  $(0, \sigma^2)$ , cada suma de cuadrados del lado derecho de la ecuación (6), al dividir por  $\sigma^2$ , una variable aleatoria ji-cuadrada con una distribución independiente. El estadístico apropiado para probar que no hay diferencias en las medias de los tratamientos es:

$$F_0 = \frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E} \quad (7)$$

Que se distribuye como  $F_{a-1, (p-1)(b-1)}$  bajo la hipótesis nula. También puede probarse la ausencia de efectos de los renglones o la ausencia de efectos de las columnas formando el cociente de  $MS_{\text{renglones}}$ ,  $MS_{\text{réplicas}}$  o  $MS_{\text{columnas}}$  con  $MS_E$ . Sin embargo, puesto que los renglones y las columnas representan restricciones sobre la aleatorización, estas pruebas quizás no sean apropiadas. En la tabla 2.3, se presenta el procedimiento de cálculo para el análisis de varianza.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$
Tratamientos	$SS_{\text{Tratamientos}} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p y_{.j}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$a - 1$	$\frac{SS_{\text{Tratamientos}}}{p - 1}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E}$
Renglones	$SS_{\text{Renglones}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{i.}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$p - 1$	$\frac{SS_{\text{Renglones}}}{p - 1}$	
Columnas	$SS_{\text{Columnas}} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p y_{.k}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$b - 1$	$\frac{SS_{\text{Columnas}}}{p - 1}$	
Error	$SS_E$ (por sustracción)	Resto	$\frac{SS_E}{\text{Resto}}$	
Total	$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$	$p^2 - 1$	Resto	

**Tabla 2.3.** Análisis de varianza de bloques aleatorizados con réplicas (Montgomery, 2005)

### 2.10.3. Comparación de medias

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

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

#### **2.10.4. Superficie de respuesta**

La metodología de superficie de respuesta (MSR) es una herramienta empleada en la investigación científica y desarrollo tecnológico, que combina el uso de los diseños experimentales, técnicas de modelación del análisis de regresión y técnicas matemáticas de optimización (Castaño, 2003). El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta para después determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos, el cual se obtiene mediante el uso del diseño experimental y la aplicación de análisis de regresión. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta (Ko-Ta y Fu-Ping, 2006).

Es por esto por lo que es uno de los métodos más ampliamente utilizados para resolver problemas de optimización en los entornos de fabricación, ya que permite estimar las condiciones óptimas de operación de un proceso y mejorar significativamente su resultado en cuanto a costos, tiempos, eficiencia, productividad, cumplimiento de especificaciones y, en fin, mejorar su calidad (Oktem et al., 2005).

En la superficie de respuesta  $\eta$  se gráfica contra los niveles de  $X_1$  y  $X_2$ , pero para ayudar a visualizar la forma de una superficie de respuesta, con frecuencia se grafican los contornos de la superficie de respuesta como se muestra en la figura 2.8. En la gráfica de contorno se trazan las líneas de respuesta constante en el plano  $X_1$ ,  $X_2$ . Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta.

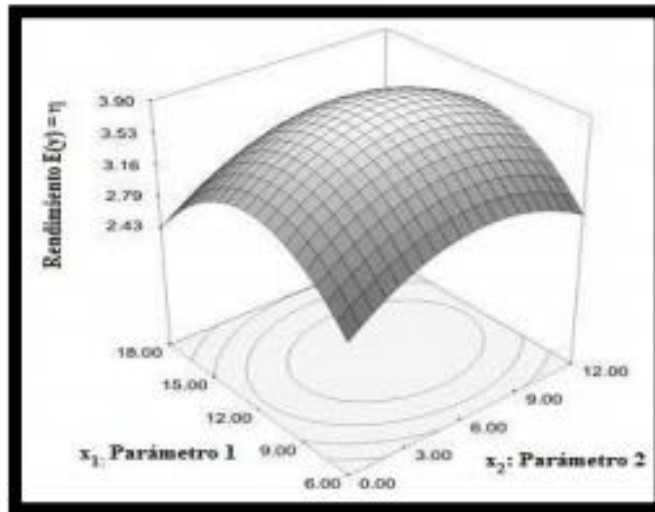


Figura 2.8. Gráfica de contorno de una superficie de respuesta.

En la mayoría de los problemas analizados mediante MSR, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto, el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre “Y” y el conjunto de variables independientes. Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es el modelo de primer orden. Si hay curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de orden superior tal como el modelo de segundo orden. La forma general de cada modelo se presenta en la figura 2.9.

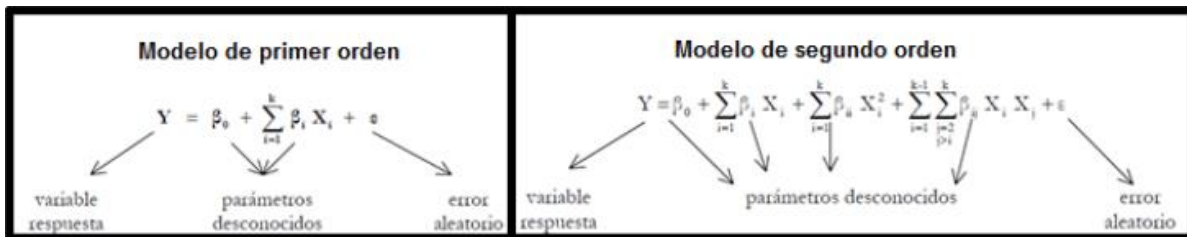


Figura 2.9. Forma general del modelo de primer orden y segundo orden.

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

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

## **2.11. Almacén y logística**

El concepto de almacenamiento ha ido cambiando y ampliando su ámbito de competencia. El almacén es, hoy por hoy, una unidad de servicio y soporte en la estructura orgánica y funcional de una compañía, comercial o industrial, con propósitos bien definidos de custodia, control y abastecimiento de materiales y productos. En la actualidad, lo que antes se caracterizaba como un espacio dentro de la empresa destinado al uso exclusivo de almacenamiento de mercancía, es una estructura clave que provee elementos físicos y funcionales capaces de generar valor agregado.

### **2.11.1. Sistema de gestión de almacenes**

Según Heizer (2004), la gestión de almacenes incluye dos actividades principales: gestión de inventario y gestión de pedidos. Estas actividades incluyen el control de los recursos internos disponibles y para suministrar recursos al taller. Por lo tanto, el proceso de gestión supervisa (a) la gestión de recepción e inventario (entrada de productos en el almacén), (b) reabastecimiento de zonas (dinámicas) de suministro, (c) asignación de inventario: asignar existencias a pedidos, (d) ordenar asignación: asignar órdenes a recursos o estaciones de trabajo, (e) balanceo de carga y control de puestos de empaque y / o recursos de preparación de pedidos, y por último, (f) etiquetado de consolidación y despacho.

Por otra parte, Tompkins (2009) dice que los constantes cambios en los mercados comerciales han influido en la gestión del almacén. Algunos de los mercados actuales son impulsados por los requisitos del cliente para reducir los costos y aumentar la satisfacción del cliente. Por lo tanto, el almacén requiere operar con un alto grado de flexibilidad, adaptabilidad y velocidad para cubrir los requisitos del cliente en mercados competitivos. De esta forma, la industria requiere que el almacén se pueda configurar y optimizar de acuerdo con los cambios en el mercado. Por lo tanto, los



sistemas de almacenamiento inteligente (IWS) han surgido para resolver estos complejos requisitos.

Por lo tanto, en el pasado los almacenes autónomos han desempeñado un papel clave en la administración de inventarios, ya que integran múltiples funciones y poseen ventajas, como una velocidad de rotación más rápida, una baja tasa de dilapidación del producto y la capacidad de almacenar más productos en un área más pequeña. Sin embargo, pocas empresas pueden permitirse el almacenamiento automático, principalmente porque requieren una gran inversión y un alto nivel de capacidades tecnológicas y de gestión (Wang et al.,2010).

### **2.11.2. La gestión de inventario**

La gestión de inventario considera los siguientes problemas (Ruiz et al., 2011): materia prima, trabajo en curso, mantenimiento, reparación, suministro operativo y productos terminados.

1. Demanda: los almacenes administran el inventario en función de dos cuestiones demanda independiente versus demanda dependiente. La demanda independiente se usa cuando la demanda de un artículo es independiente de la demanda de cualquier otro artículo. La demanda dependiente se usa cuando la demanda de un artículo depende de la demanda de algún otro artículo.

2. Costos de inventario: los costos incluyen (a) costos de mantenimiento (asociados con la posesión o 'portación' de inventario a lo largo del tiempo, obsolescencia, seguro y daño), (b) costos de pedido (asociados con los costos de realizar un pedido y recibir bienes , es decir, suministros, formularios y procesamiento de pedidos) y (c) costos de instalación (costo para preparar una máquina o proceso para la fabricación de una orden, es decir, costos de limpieza, costos de reaprovechamiento y costos de ajuste).

3. Modelos de inventario: hay tres tipos de modelos principales (a) modelos de cantidad de pedido fijos que incluyen: cantidad de orden económica (EOQ), cantidad de orden de producción (POQ) y descuento por cantidad (QD), (b) modelos probabilísticos que permiten variar la demanda y consideran el nivel de servicio y el stock de seguridad y (c) los modelos de período de orden fijo donde los pedidos se realizan a intervalos fijos.

4. Gestión del proveedor: el sistema de gestión del proveedor controla las condiciones (tiempo de entrega, costo y calidad) que ofrecen los proveedores para comprar material.
5. La administración del proveedor supervisa: (a) asegurar que los requisitos de producción se cumplan en tiempo y calidad y (b) que cubra los requisitos generados por los modelos de inventario.
6. Uso de inventario: la gestión de inventario se basa en reglas de uso de materiales como FIFO (First in-first out), LIFO (Last input-first out), control de fecha de caducidad (es decir, alimento), control basado en número de lote, etc.
7. Planificación de recursos materiales: la planificación de recursos materiales (MRP) determina la cantidad y el tiempo de los artículos de demanda dependientes. Por lo tanto, MRP influye en el proceso de planificación de la producción.

### **2.11.3. Asignación de flujo de valor (VSM)**

Value Stream Mapping (VSM) es una de las mejores herramientas para mapear un proceso y eliminar sus problemas críticos, que produce resultados satisfactorios si se aplica a los procesos de producción (Carmignani 2017). El uso de Value Stream Mapping (VSM) es una técnica importante utilizada en la fabricación ajustada para identificar desechos al adaptarse, según sea necesario, a la fabricación ecológica y sostenible. Un flujo de valor se define como todas las acciones que poseen tanto valores agregados como sin valor, actualmente requeridos para llevar un producto a través de los flujos principales esenciales para cada producto: el flujo de producción desde la materia prima hacia los brazos del cliente, y el flujo de diseño desde el concepto hasta el lanzamiento (M. Rother et al., 1999).

El VSM convencional ha sido aclamado como una técnica muy útil para identificar oportunidades y eliminar los desechos en un sistema. El beneficio radica en poder presentar visualmente (y de manera clara) el estado de funcionamiento de una línea de producción o cualquier otro sistema estudiado (Faulkner et al., 2014). La Figura 2.10 muestra un ejemplo de VSM, comienza desde el servicio al cliente, incluyendo el programa y termina en el proceso de transformación-movimiento del sujeto.

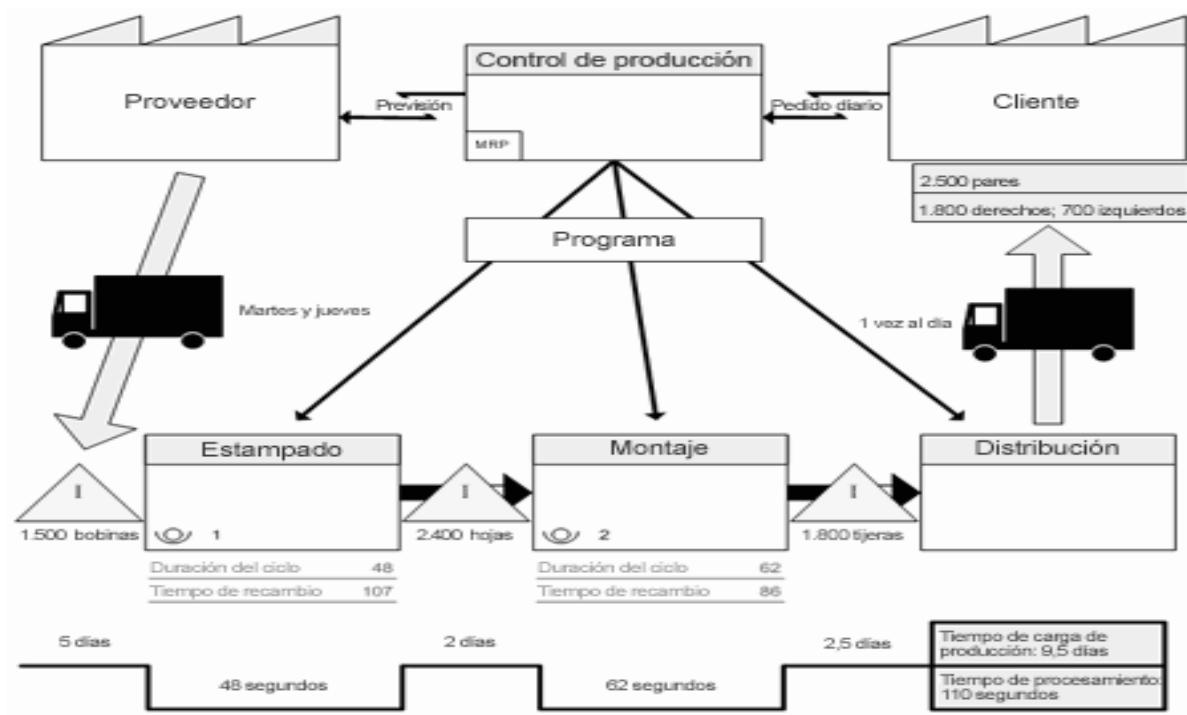


Figura 2.10. Ejemplo básico VSM

## 2.12. Análisis de estudios previos

A continuación, se presentan dos estudios previos donde se utilizó el diseño de experimentos y metodología de superficie de respuesta para mejorar el aspecto de una parte moldeada por inyección.

**Estudio previo 1:** Entre los estudios de aplicación de diseño experimental, se encuentra el trabajo abordado por Ortiz Espinoza (2014), al realizar un diseño de experimentos en el proceso de moldeo por inyección de la pieza 1-1532082-9 se concluye que el factor principal que interviene en la calidad del producto es un par de fixture llamados "Pin". Después de rediseñar el fixture se obtuvieron mejores resultados en el proceso de producción teniendo 0 piezas fuera de especificación para ambos orificios.

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

**Estudio previo 2:** Entre los estudios de aplicación de metodología MSR, se encuentra el trabajo abordado por Mata-Cabrera (2013) con el fin de analizar los efectos de los parámetros del proceso (velocidad de corte y velocidad de avance) en las respuestas ( $R_t$ ,  $R_q$ ,  $R_a$ ,  $R_p$ ), los experimentos se planificaron según el método de diseño factorial completo. En lo que respecta a la influencia de las condiciones de corte (parámetros funcionales de corte), se ha demostrado que la variación de la velocidad de avance, dentro de los valores seleccionados, afecta más a los resultados (fuerzas de corte, acabado superficial) que la variación de la velocidad de corte.

A medida que aumenta la velocidad de avance, aumentan las fuerzas de corte y la rugosidad de las superficies mecanizadas, obteniéndose, por tanto, resultados peores. Se han desarrollado modelos matemáticos no lineales de segundo orden para  $R_t$ ,  $R_q$ ,  $R_a$  y  $R_p$  utilizando la metodología de superficie de respuesta. Los modelos de predicción han mostrado validez dentro del rango de parámetros de corte utilizados. Este trabajo de investigación propone el diseño y la implementación de modelos matemáticos tendientes a optimizar los procesos de mecanizado de elementos mecánicos.

### 3. METODOLOGÍA

En el capítulo anterior se menciona la importancia de los parámetros y su relación con la calidad del producto final, el control de las variables de respuesta para el proceso de formado de foam es fundamental para mantener en condiciones adecuadas el moldeo del material. La metodología utilizada que se aplicará para el caso de estudio según Sampieri (2014) es de tipo experimental, ya que se realizará un análisis de los parámetros de inyección con diseño de experimento en el proceso de inyección aplicado en las fases independientes del proceso por las que pasa el material (Ver figura 3.1).

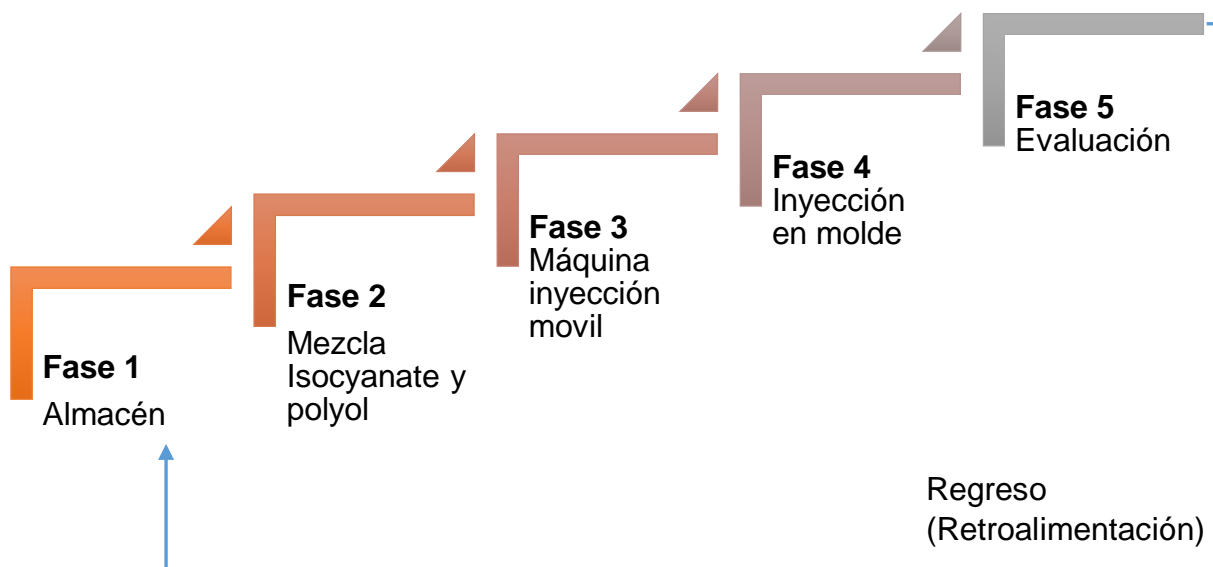


Figura 3.1. Diagrama de metodología aplicado en proceso de inyección foam

#### 3.1 Fase 1: Almacén de materiales

Como se revisó en el capítulo anterior, el área de almacenes es responsable del resguardo de los materiales, así como controlar, suministrar y requerir de los mismos; la calidad de los productos es algo que también debe de asegurar en esta etapa de la cadena de suministro. Los materiales utilizados para crear el foam tienden a perder calidad si éstos no se almacenan en condiciones específicas, una de ellas es el control de la temperatura ambiental y la otra el control de vencimiento del material. Cuando el material no cumple con esos cuidados, ya sea proveniente de proveedor

o almacén, los químicos polyol e isocyanate pierden calidad en la densidad, y los valores de la prueba tienden a salirse de control, o se observa un comportamiento anormal.

En la etapa de almacén se deberá asegurar que el proveedor y almacén cumplan con las especificaciones de control de calidad de los materiales polyol e isocyanate, requeridos por del área de foam y de recepción de materiales.

### **3.2. Fase 2: Análisis de mezcla**

Para que el material cumpla con las características de calidad es necesario controlar diversos factores que afectan el producto, tales como la temperatura ambiental, caducidad de los químicos, volumen del material y recipientes de medición, densidad etc. El parámetro de densidad de la mezcla es considerado uno de los más importantes para garantizar la calidad de foam, ya que diversas imperfecciones son causadas por dicho parámetro.

#### a) Propiedades de los materiales:

Primeramente, en esta etapa del estudio se establecerán las propiedades requeridas de la mezcla que son utilizadas para garantizar el control de la calidad enfocada a la densidad requerida en la prueba de densidad.

#### b) Prueba interna de densidad:

Para hacer el análisis estadístico del diseño experimental, previamente se realizará el estudio y se asegurará que la mezcla cumpla con las especificaciones internas, esto será de acuerdo al proceso de prueba de material establecido de la empresa, mismo que se muestra en la figura 3.2 y siguiendo la instrucción de trabajo. Así mismo, el estudio deberá realizarse por una persona certificada y utilizando el equipo de seguridad apropiado

#### c) Análisis de densidad:

El análisis de la densidad será evaluado mediante control estadístico de calidad por medio de cartas de control por variables y capacidad del proceso tomando muestras diarias en el área de foam,

### Diagrama de secuencia de la prueba de almacén de material

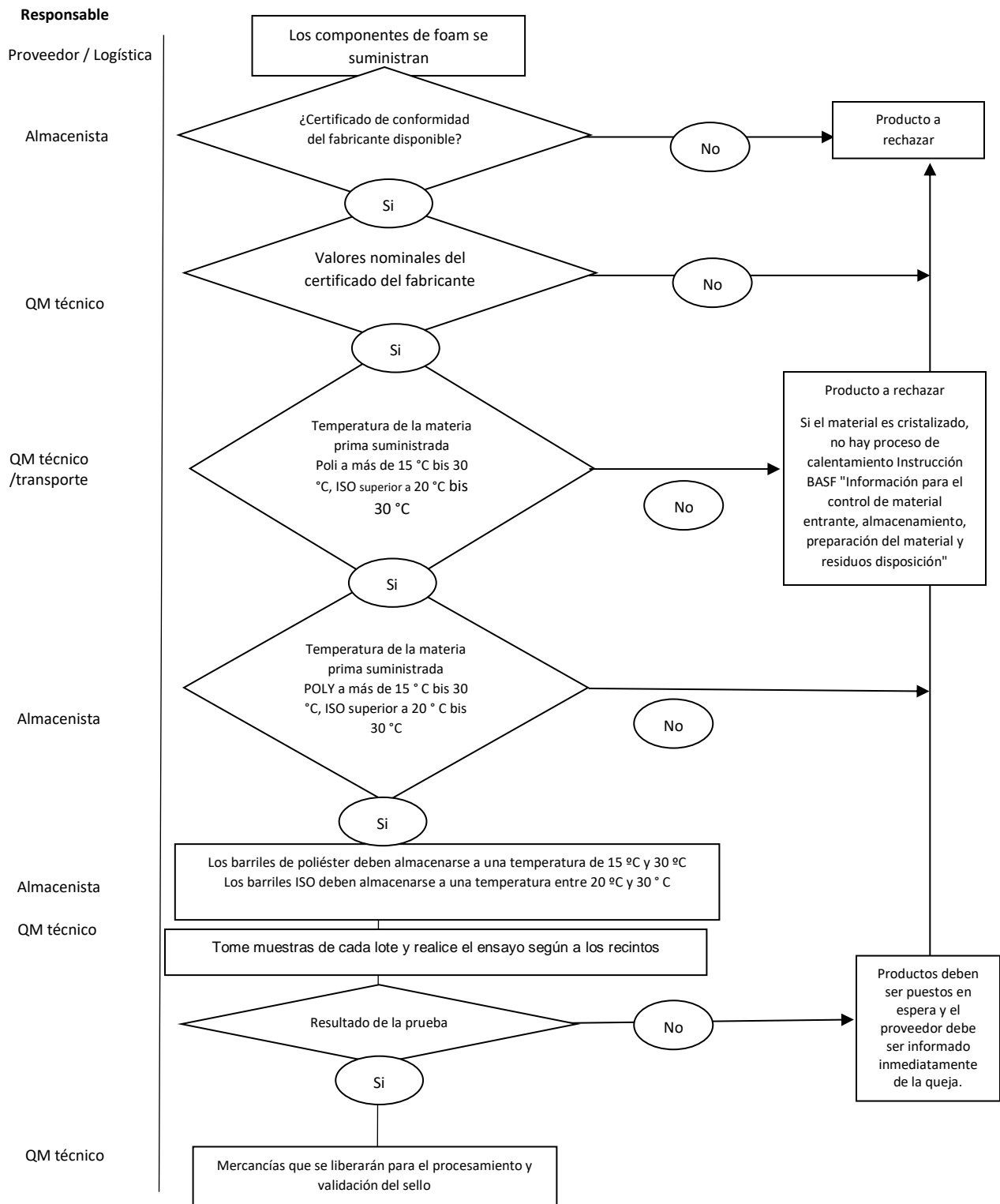


Figura 3.2. Secuencia de la prueba de almacén de material

### 3.3. Fase 3: Condiciones de la máquina

#### 1. Recepción de material

Establecer las condiciones de recepción de material a la máquina, así como los parámetros de control en el suministro de material del área de tanque diario.

- Material cristalizado

La cristalización es un modo de falla en el material ISO, se debe de asegurar que no se presente esta condición antes de suministrarse a la máquina. Si la ISO ya está cristalizada (debido a una entrega o almacenamiento incorrectos), se debe de poner en contacto con el proveedor de materiales. El material podría calentarse nuevamente según los requisitos definidos. Debe considerar las hojas de datos de seguridad de su sistema de espuma.

- Material vencido

Asegúrese de que el método de primero en entrar es el primero en salir para el almacenamiento de material para evitar material vencido. Si se detectan barriles que ya han expirado, realice nuevamente una inspección entrante del material antes de usarlo en producción para verificar si el mismo todavía cumple con la especificación (densidad, tiempo de elevación...), entonces se tiene que marcar los barriles. Si no cumple con la especificación, debe eliminarlo.

- Cambio de material en la máquina espumante

Después de la conexión del componente Polyol (barril) en la estación de barril, se debe garantizar una homogeneización correcta del material. El material debe revolverse primero con una frecuencia de alta velocidad durante un mínimo de 15 minutos antes de que los tanques diarios se llenen automáticamente. Esto es importante para máquinas que no tienen un control separado que garantiza la agitación durante un tiempo definido con una frecuencia de velocidad definida antes de llenar el tanque. El componente Isocyanate no se agita antes de conectarse a la estación de barril. El material ya es homogéneo.



- Cintas calefactoras para barriles de material en la máquina espumante

En algunas áreas de producción, es necesario equipar los barriles de material (estación de barril) con cinturones de calefacción durante el invierno. Esto depende de la temperatura ambiental de la máquina espumante y del rendimiento del material durante la producción en funcionamiento.

## 2. Parámetros de ajuste de la máquina

### a) Mantenimiento en la máquina espumante

La base es la recomendación de la documentación de la máquina del proveedor. El mantenimiento está separado en tareas diarias, semanales, mensuales y anuales. El mantenimiento depende de la configuración de la máquina y la carga de trabajo.

### b) Verificación diaria de parámetros

Durante la configuración de la máquina se definen diferentes parámetros (presión primaria, presión de mezcla, temperatura...) por el proveedor junto con el personal responsable. Los parámetros dependen de la propia configuración de la máquina, del sistema de espuma utilizado, de la temperatura ambiental y de la altura sobre el mar. Antes de iniciar la producción, los parámetros de ajuste deben ser verificados por el técnico de la máquina. Todas las desviaciones o cambios necesarios deben ser documentados.

### c) Liberación de la máquina de foam según instrucciones internas.

Si el equipo se utilizará para un producto adicional con requisitos más estrictos del cliente (por ejemplo, tolerancias / valor de  $C_{Mk}$ ...), deberá realizarse una nueva recalificación de acuerdo con el protocolo de liberación.

## 3. Evaluación del valor $C_{Mk}$ y $C_M$

Debido a diferentes influencias (temperatura ambiental, temperatura del material, viscosidad del material ...), nunca se alcanzará el flujo de medición mostrado (peso total en g/s). Lo importante es asegurar la estabilidad del proceso. Esto se cumplirá utilizando el valor promedio de la serie de mediciones como base para el cálculo del valor  $C_{Mk}$  y  $C_M$ .

### 3.4. Fase 4: Molde externo

Los moldes son un elemento importante para dar el formado del material sobre el arnés, existen varios factores que influyen en el desperdicio de material al momento de inyectar foam sobre el arnés, tales como desgaste del molde por falta de mantenimiento, incorrecto ruteo del arnés sobre el molde antes de aplicar el material, grosor variable del arnés etc. Algunas de estas condiciones suelen ser complicadas de controlar. Para esto, se realizará un análisis en la etapa final del proceso de inyección.

a) Descripción del proceso de inyección

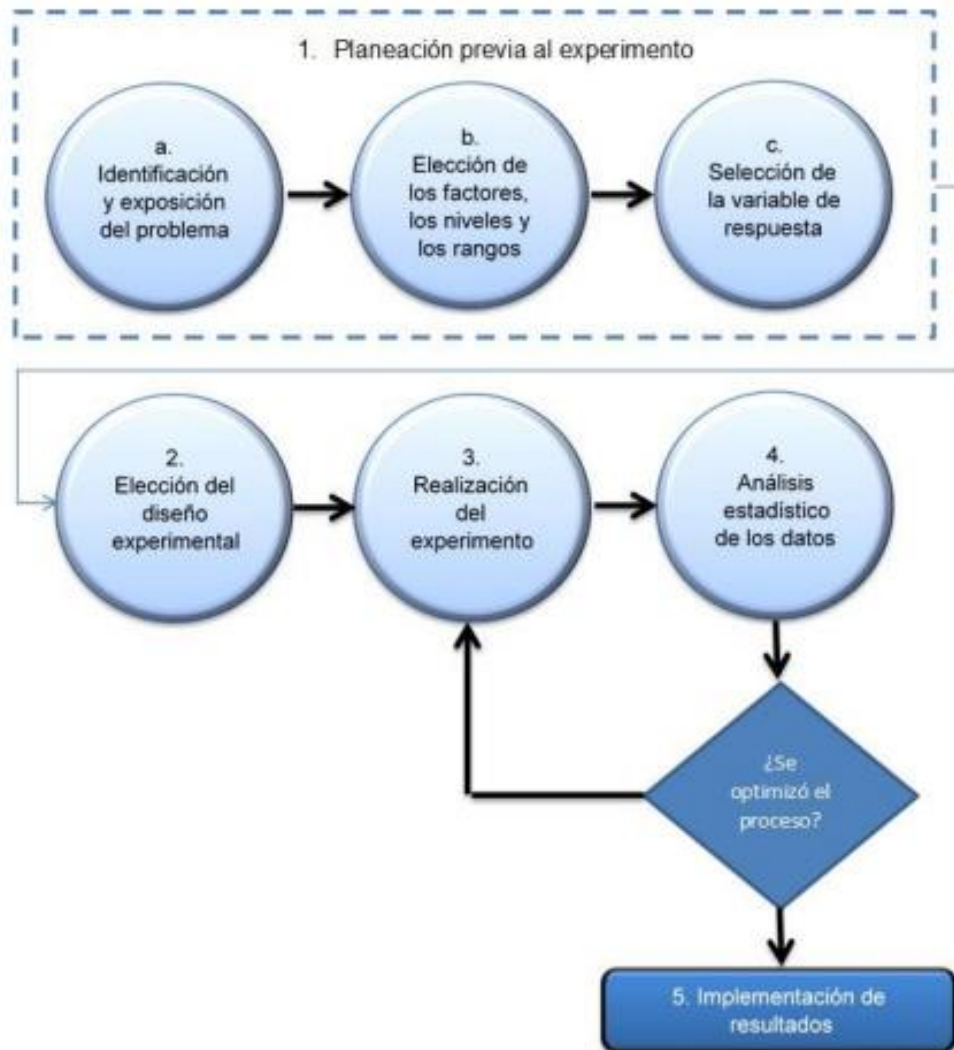
Describir el procedimiento actual de inyección de foam sobre el arnés, donde se explique los procedimientos que realiza el técnico de moldeo para inyectar la mezcla, incluyendo la preparación previa de inyección y posterior al retiro del producto final.

b) Análisis de desperdicio de material

Para conocer el estado actual del desgaste de material, se deberá producir varios arneses con foam inyectado del N/p: 225428100. Con la ayuda de un técnico de foam (ya que se obtengan las muestras) estas se retrabajarán quitándoles el exceso de material con el instrumento apropiado según las instrucciones de retrabajo del área.

c) Diseño de experimento en inyección final

Para realizar el diseño experimental, se seguirá con la metodología para realizar un diseño de experimentos expuesta por Montgomery (2005) ver figura 3.3., en donde se muestran los pasos a seguir realizar el experimento.



**Figura 3.3.** Metodología para realizar un diseño de experimentos (Montgomery, 2005)

De la figura anterior 3.3, se describen las siguientes etapas que se deben tomar en cuenta para realizar y evaluar el diseño de experimentos:

1. Planeación previa al experimento
  - a) Identificación y exposiciones problema
  - b) Elección de los factores, los niveles y los rangos
  - c) Selección de la variable de respuesta
2. Elección del diseño de experimento
3. Realización del experimento
4. Análisis estadístico de los datos
5. Implementación de resultados

### **3.5. Fase 5: Evaluación**

En esta fase de la metodología, se darán los resultados previos al análisis ANOVA del diseño experimental, observaciones de los resultados estadísticos obtenidos en la prueba e implementación práctica de la metodología, y se analizará el comportamiento de los resultados implementados en el área productiva. También es necesario presentar resultados de ahorro de tiempo y dinero para comparar la mejora de beneficio que la empresa tendría en caso de seleccionar los parámetros que mejor convengan, así como conocer e interpretar la información de los datos arrojados por la evaluación final.

En el caso de realizar una réplica del diseño de experimentos con diferentes parámetros, ya sea porque se requiera tener un valor más exacto o requerir evaluar con variantes del sistema; es necesario dar un comparativo de los resultados obtenidos de las corridas que el evaluador desee realizar en esta última fase en la etapa de la implementación.

## 4. IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se implementa las fases de la metodología propuesta en el capítulo anterior.

### 4.1. Fase 1: Almacén de materiales

Siguiendo el diagrama de proceso mostrado en la figura 3.2 del capítulo anterior, se dio seguimiento a los requerimientos de almacenaje para asegurar que el material disponga de las condiciones ideales, para garantizar que la prueba de densidad no se vea alterada y que la calidad del producto final mejore (Ver figura 4.1).



**Figura 4.1.** Tambos de material

Las condiciones de temperatura el día de la implementación de prueba en el área productivo fueron aprobados según el diagrama de la figura 4.2 con un valor de 23 grados Celsius.



**Figura 4.2.** Termostato del área de foam

Para el caso de estudio, la empresa recomienda que los lotes de los dos materiales no se encuentren en fechas vencidas, ya que esta condición puede generar una pérdida en la calidad de la mezcla. Por tal razón al proceso se debe de suministrar tambos que cumplan con primeras llegadas primeras salidas tomando en cuenta la caducidad de los dos materiales que componen el foam. El material de llegada es inspeccionado por el departamento de recibo antes de ser mezclado. (Ver tabla 4.1. y 4.2. para cada químico)

Reporte de Resultados de Inspección de Recibo por Variables y Atributos																	
Numero de parte leoni <b>300006444</b>								descripción <b>ELASTOFOAM RESIN POLY</b>									
Numero de proveedor <b>14610/101</b>								Proveedor autorizado <b>POLIOLES</b>								Resultado final del lote:	
#	Características a inspeccionar	Atributos Variables	Fecha de Validación	Especificación Nominal	Min.	Máx.	Método/ Equipo de Medición	Resultados de la Inspección: Anotar Ac o Re según los resultados de las lecturas, y el valor de Cpk/Ac o Re (Cpk $\geq$ 1.67 Ac, Cpk $<$ 1.67 Re), cada vez que se completen los 3 lotes de 50 mediciones cada uno, si es una característica por variables. Si el componente ya alcanzó certificación en atributos o variables o ambos, anotar en cada cuadro la letra "C"; después de esto no es necesario registrar cada recibo de material.						Lote#	Ac/Re		
								Ac	AC	AC	AC	AC	AC			AC	AC
1	COLOR	A	6-Sep-17	NEGRO	N/A	N/A	VISUAL	Ac	AC	AC	AC	AC	AC	162	AC		
2	EMPAQUE	A	6-Sep-17	S/DAÑO	N/A	N/A	VISUAL	Ac	AC	AC	AC	AC	AC	163	AC		
3	APARENCIA	A	6-Sep-17	C/PLANO	N/A	N/A	VISUAL	Ac	AC	AC	AC	AC	AC	164	AC		
4	#DE PROVEEDOR	A	6-Sep-17	14610/101	N/A	N/A	VISUAL	Ac	AC	AC	AC	AC	AC	165	AC		
6	RESULTADO (DENSIDAD)	V	6-Sep-17	535	460	610	Bascula	516	554	524	571	545	563	166	AC		
7	PICNOMETRO (PESO)	V	6-Sep-17		0	0	VERNIER	203	212	206	221	209	215	167	AC		
														168			
	Peso de Picnometro con agua 182.5													169			
	Vaso Nuevo													170			
								Instrucciones:									
Numero de lote recibido								206514853	206514853	206548482	206626420	206658444	206742647	1. Cada lote recibido debe registrarse, hasta que se complete la certificación.			
Fecha de fabricacion								29-Aug-17	29-Aug-17	12-Sep-17	7-Oct-17	19-Oct-17	15-Nov-17	2. Se genera un reporte por separado cuando un componente tenga más de un proveedor aprobado.			
Peso del vaso sin cortar								291	304.5	291.6	289	295.7	283.4	3. Si una característica es rechazada (atributo o variable) el lote debe rechazarse, identificar con etiqueta roja y enviarlo a la jaula de cuarentena y generar NC/R.			
Peso del vaso cortado								235	251.8	226.7	247.1	235.7	243.3	4. Utilizar los instrumentos de medición o métodos especificados.			
Cantidad recibida								12000	12000	11800	10000	2200	12000	5. Cuando las características a inspeccionar excedan de 15, utilizar otra hoja como continuación iniciando con el No. 16.			
Nivel de inspección:								1	1	1	1	1	1	6. Para certificar por atributos se inspeccionan 3 lotes normales más 2 reducidos. Para variables son 3 lotes normales.			
Tipo de muestra por atributos (Normal / Reducida):								N	N	N	R	R	N	7. Si el material viene en rollo tomar 5 muestras de cada rollo o 2 mt. continuos en caso de ser cable.			
Cantidad de la muestra a inspeccionar (Tambo)								1	1	1	1	1	1				
Defectos encontrados:								0	0	0	0	0	0				
Revisión								N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A				
SCR # cuando se rechaze una o más características:																	
Disposición final (RTV=Se regresó al proveedor; Scrap, UAI=Usese como está; DESV=Usado con desviación de Ing. O del Cliente; SRT=Se sorteo 100%; RWK=Se retrabajó 100%																	
Fecha de recibido:								9/5/17	25-Sep-17	11-Oct-17	24-Oct-17	30-Oct-17	20-Nov-17				
Fecha de inspección:								9/6/17	25-Sep-17	11-Oct-17	24-Oct-17	26-Oct-17	21-Nov-17				
Inspector No:								3138/10422	3138/10422	3138/10422	3138/10422	3138/10422	3138/10422				
Lote No (No consecutivo iniciando con el 1):								162	163	164	165	166	167				

Tabla 4.1. Inspección de recibo de Polyol

Reporte de Resultados de Inspección de Recibo por Variables y Atributos															
Numero de parte leoni 300006443								descripeion ISO 134/3 ISOCYANATE COMPONENT							
Numero de proveedor 134/3								Proveedor autorizado POLIOLES						Resultado final del lote:	
#	Características a inspeccionar	A Atributo V Variable	Fecha de Validación	Especificación Nominal	Min.	Máx.	Método/Equipo de Medición	Resultados de la Inspección: Anotar Ac o Re según los resultados de las lecturas, y el valor de Cpk/Ac o Re (Cpk= 1.67 Ac, Cpk<1.67 Re), cada vez que se completen los 3 lotes de 50 mediciones cada uno, si es una característica por variables. Si el componente ya alcanzó certificación en atributos o variables o ambos, anotar en cada cuadro la letra "C"; después de esto no es necesario registrar cada recibo de material.						Lote#	Ac/Re
1	COLOR	A	17-Ene-2017	AMBAR	N/A	N/A	VISUAL	AC	AC	AC	AC	AC	AC	135	AC
2	EMPAQUE	A	17-Ene-2017	S/DAÑO	N/A	N/A	VISUAL	AC	AC	AC	AC	AC	AC	136	AC
3	APARIENCIA	A	17-Ene-2017	C/PLANO	N/A	N/A	VISUAL	AC	AC	AC	AC	AC	AC	137	AC
4	#DE PROVEDOR	A	17-Ene-2017	134/3	N/A	N/A	VISUAL	AC	AC	AC	AC	AC	AC	138	AC
5	DENSIDAD(MEZCLA)	V	17-Ene-2017	535	460	610	VERNIER	AC	AC	AC	AC	AC	AC	139	AC
6	RESULTADO (DENSIDAD)	V	17-Ene-2017		0	0	VERNIER	505	516	509	540	518	548	140	AC
7	PICNOMETRO (PESO)	V	17-Ene-2017		0	0	VERNIER	186	192	189	196	194	198	141	
														142	
	Vaso Nuevo													143	
								Instrucciones:							
Numero de lote recibido								206399759	206456703	206471235	206561225	206573568	206627523		
Fecha de fabricacion								28-07-17	10-Aug-17	15-Aug-17	15-Sep-17	18-Sep-17	5-Oct-17		
Peso del vaso sin cortar								289.1	290.1	291	301.6	289.2	288.5		
Peso del vaso cortado								224.9	233.3	232.6	245.4	223.9	236.8		
Cantidad recibida								4400	4400	4400	3520	4400	4400		
Nivel de inspección:								1	1	1	1	1	1		
Tipo de muestra por atributos (Normal / Reducida):								N	N	N	R	R	N		
Cantidad de la muestra a inspeccionar (Tambo)								1	1	1	1	1	1		
Defectos encontrados:								0	0	0	0	0	0		
Revisión								0	0	0	0	0	0		
NCMR# cuando se rechaza una o más características:															
Disposición final (RTV=Se regresó al proveedor; Scrap, UAI=Usese como está; DESV=Usado con desviación de Ing. O del Cliente; SRT=Se sorteo 100%; RWK=Se retrabajó 100%)															
Fecha de recibido:								27-Jul-17	16-Ago-17	5-Sep-17	25-Sep-17	11-Oct-17	24-Oct-17		
Fecha de inspección:								28-Jul-17	17-Ago-17	6-Sep-17	25-Sep-17	11-Oct-17	24-Oct-17		
Inspector No:								3138/10422	3138/10422	3138/10422	3138/10422	3138/10422	3138/10422		
Lote No (No consecutivo iniciando con el 1):								135	136	137	138	139	140		

Tabla 4.2. Inspección de recibo de Isocyanate

## 4.2. Fase 2: Análisis de mezcla

### 4.2.1. Propiedades de los materiales:

El foam está compuesto por la mezcla de los químicos Isocyanate (ISO) y Polyol (POLY), la cual comprende el 29% de ISO y 71% de POLY. Como se mostró en la fase anterior, la temperatura ambiental es controlada para poder garantizar la calidad del material, el material ISO debe de controlarse entre 20°C a 30 °C y el POLY de 15°C a 30°C; estas condiciones deben respetarse no solo en la etapa de almacén, sino también en el área de producción antes de ser aplicado al molde, por lo que no solo se hacen pruebas de inspección de la densidad cuando llega del proveedor, sino también en el área de producción.

#### 4.2.2. Prueba interna de densidad

La prueba de densidad es un proceso interno predeterminado por la empresa, a continuación, se explica el procedimiento que se realiza para llevar a cabo la evaluación de la densidad del material mezclado.

1. Selección del equipo de la prueba (Ver figura 4.3)
  - Copa sin forro interior para ser utilizado
  - Tubo Greiner (Volumen de 68 ml, Zylinder con 36 mm de diámetro/ 82 mm de alto)
  - Resolución de escala 1g
  - Cronómetro, precisión de lectura de 1 seg.
  - Pycnómetro calibrado
  - Agitador: mínimo 1500 rpm con disco "Lenart", 65 mm de diámetro
  - Lenart Disk "dimeter 220 mm para la dirección del tambor
  - Equipo de protección (guantes / gafas de seguridad)
  - Termómetro



**Figura 4.3.** Equipo de protección personal para manejo de material foam

2. Recoger las muestras (Ver figura 4.4)



**Figura 4.4.** Equipo de uso de pruebas para material foam

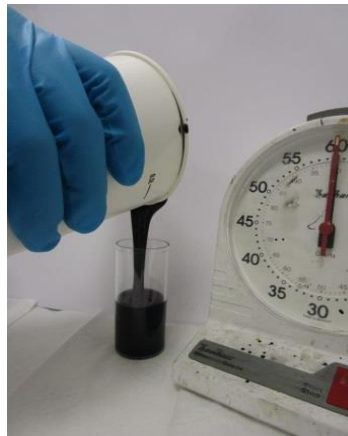


3. POLY e ISO que deben calentarse hasta 20 °C.
4. Asegurarse de que tiene todo el equipo preparado (escala, tazas, agitador)
5. Pesar el vacío "Greiner tubo".
6. Colocar proporción de mezcla del POLY y el ISO en una nueva taza.
7. La mezcla debe ser agitada inmediatamente de forma homogénea usando un agitador durante un período de  $10 \pm 2$  seg. / aproximadamente 15.000 rpm (Ver figura 4.5)



**Figura 4.5.** Equipo de mezclado del material

8. El cronómetro se activará al arrancar el agitador.
9. Llenar la mezcla en el "tubo Greiner" (Ver figura 4.6)



**Figura 4.6.** Mezcla en el "tubo Greiner"

10. Al final del tiempo de subida (expansión del material), tome nota de la hora del cronómetro y deje que el reloj siga funcionando (Ver figura 4.7)



**Figura 4.7.** Reacción del material

11. Introducir el tiempo de subida en el gráfico.
12. Comprobar el tiempo de ajuste tocando con un dedo (el material espumado puede no dibujar ninguna cuerda después de un tiempo definido).
13. Duración: Consulte el recinto particular.
14. Cortar la espuma superpuesta del "tubo Greiner" en la llanta.
15. Pesar el "tubo Greiner".
16. Calcular la diferencia de peso (vacío "tubo Greiner" y "tubo Greiner" con espuma).

$$p \text{ (Densidad)} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{m \text{ (tubo greiner + foam - tubo vacio greiner)} [g]}{0,00069 [\text{m}^3] * 1000} \quad (9)$$

17. Documentar los valores de densidad

#### **4.2.3. Análisis de densidad:**

Para realizar el análisis de densidad, se tomaron 33 valores que correspondieron a un periodo de 24 días para ambos turnos. Con la ayuda del software Minitab 2017 se efectuaron los cálculos y se construyeron las gráficas. En la figura 4.8 se observa que la densidad del material se encuentra por encima de LC de los valores que usa la empresa. Al ajustar los valores del gráfico  $\bar{x}$ -S con la muestra obtenida, se determinó que los valores de los límites de control que mejor se ajustan son LC= 548.01, LSC= 578.15 y LIC= 517.88 kg/m<sup>3</sup>, con  $\bar{s}$ = 18.51, LSC= 41.94 y LIC= 0 y en base a  $1 \leq C_p \leq 1.33$ , los valores de  $C_p$  y  $C_{pk}$  adecuados son 1.09 pero se requiere de un control estricto conforme  $C_p$  se acerca a uno. (ver figura 4.9)

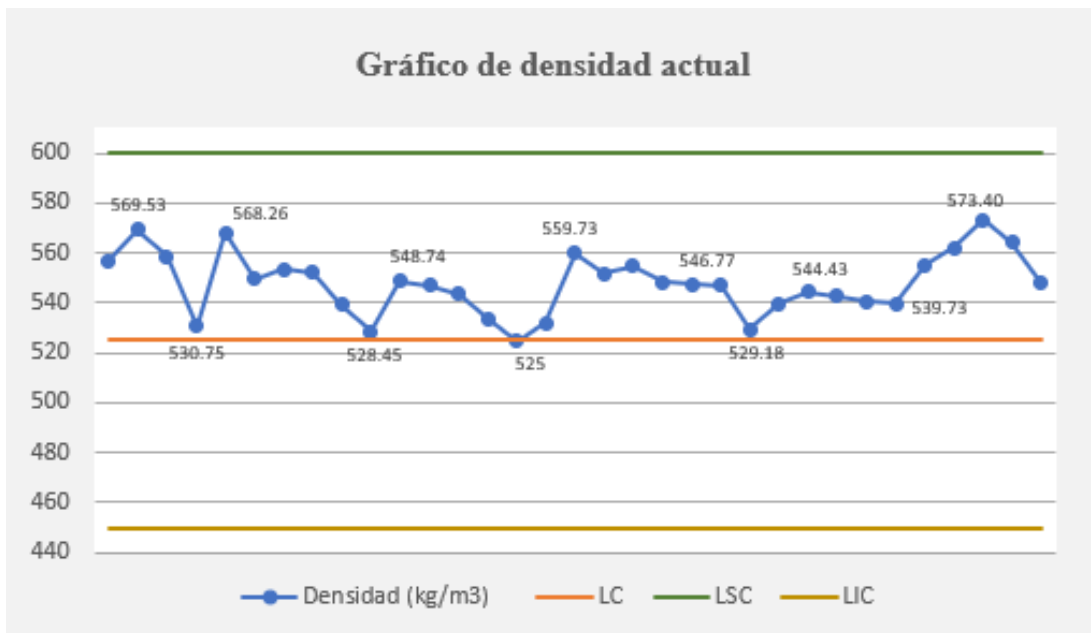


Figura 4.8. Gráfico de densidad actual

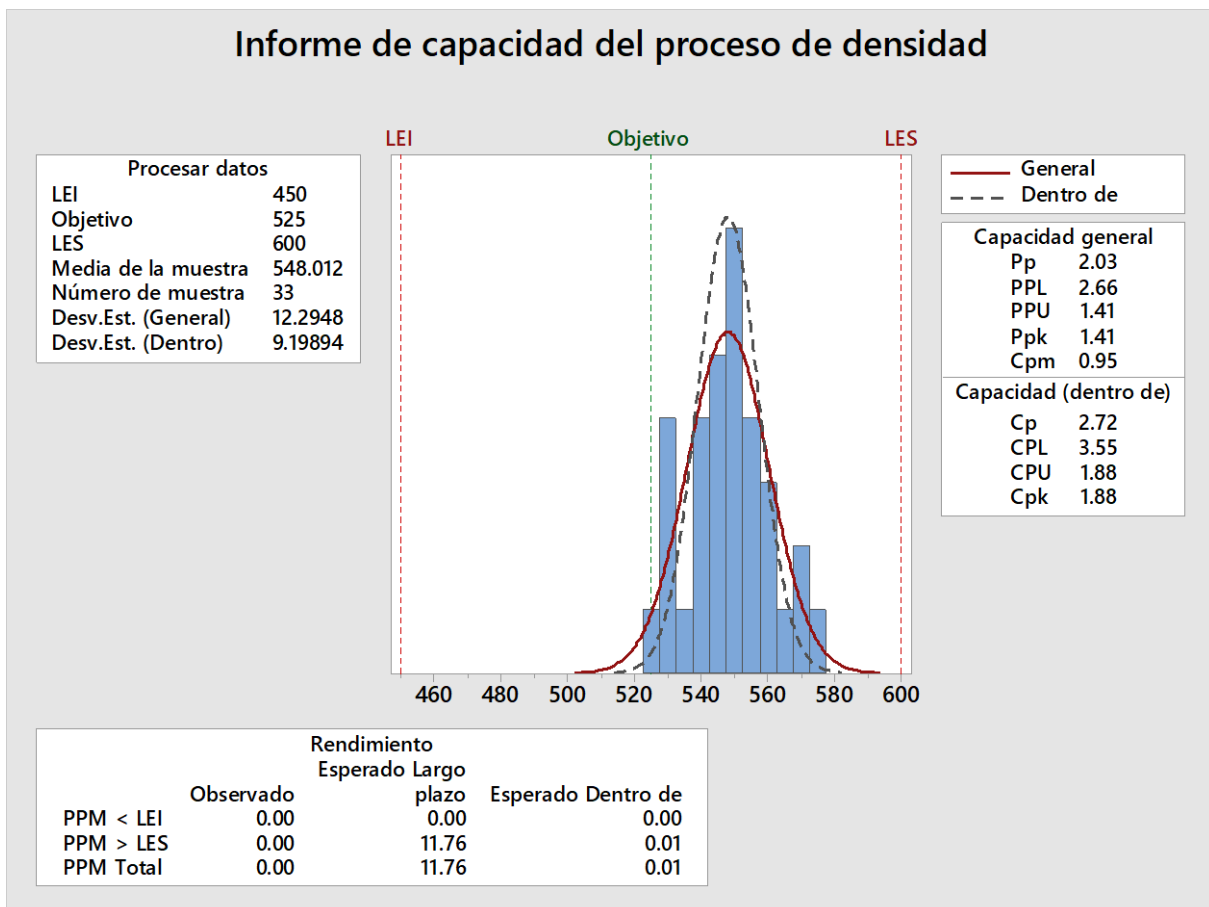


Figura 4.9. Capacidad del proceso real

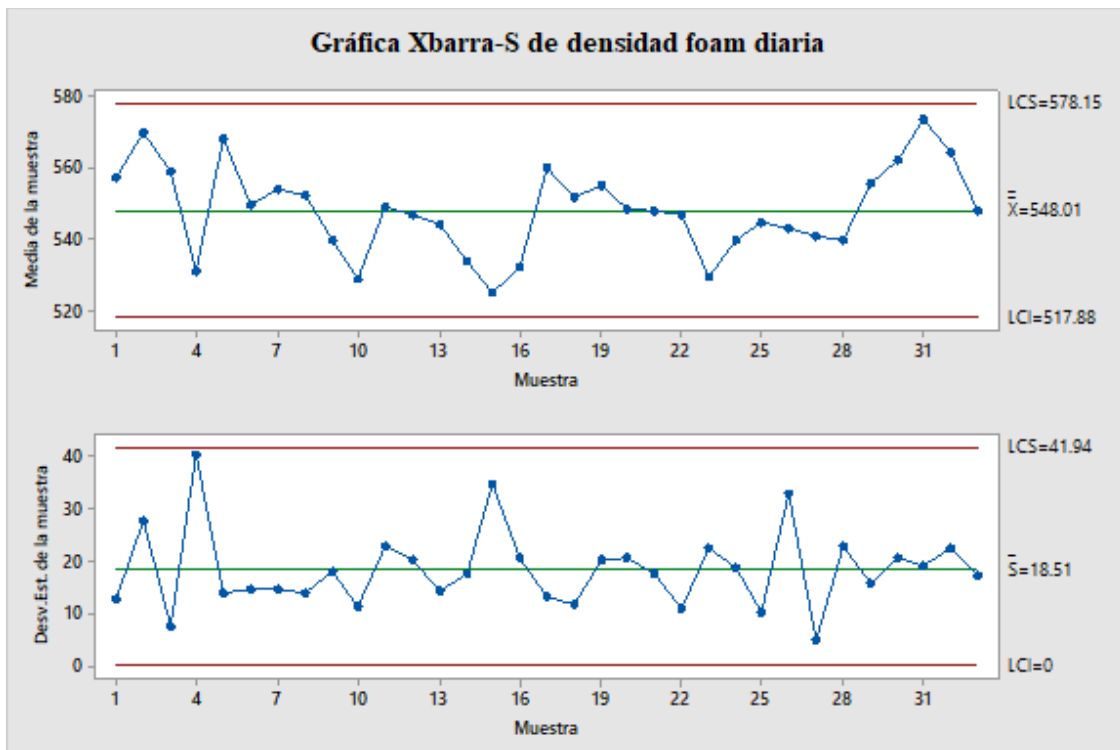


Figura 4.10. Gráficas  $\bar{x}$ -S de la densidad foam diaria

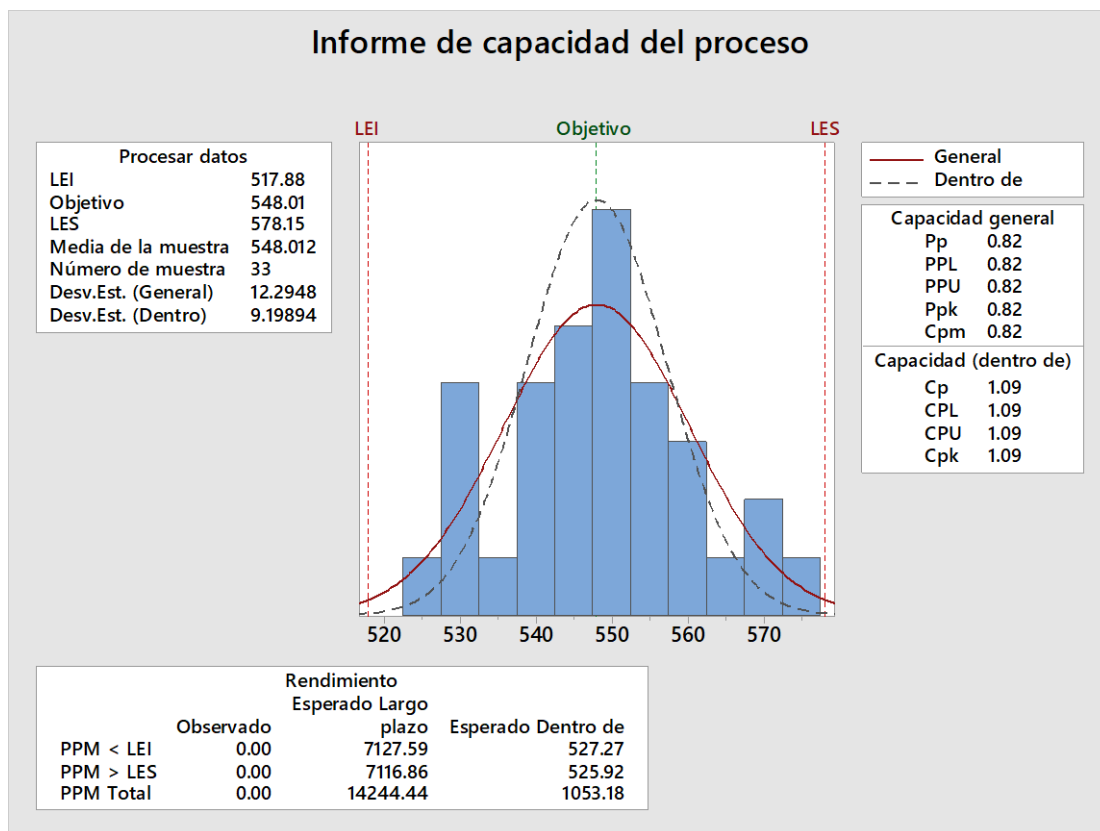


Figura 4.11. Capacidad del proceso propuesto

### 4.3. Fase 3: Condiciones de la máquina

De las condiciones del material en la etapa de recepción y suministro de material, no se presentaron condiciones de cristalización en el ISO, los barriles de suministro se encontraban dentro de vigencia; aunque la empresa no cuenta con un sistema de control para el material con mayor proximidad de vigencia, se requirió en el área el uso de material que cumpliera con la vigencia y que se manejara el sistema de primeras entradas-primeras salidas, normalmente esto se realiza por especificación de instrucciones de trabajo pero se ha dado el caso de pérdidas de tambos de material por falta de este control. (Ver figura 4.12)

Al no presentar cambio en los materiales, no fue necesario el cálculo de los indicadores de capacidad que se manejan en la empresa  $C_{Mk}$  y  $C_M$ . En el caso de producción diario, se monitorea que los paneles de control no presenten cambios en los parámetros de producción. (Ver figura 4.13)



Figura 4.12. Material en contenedores de suministro de la máquina

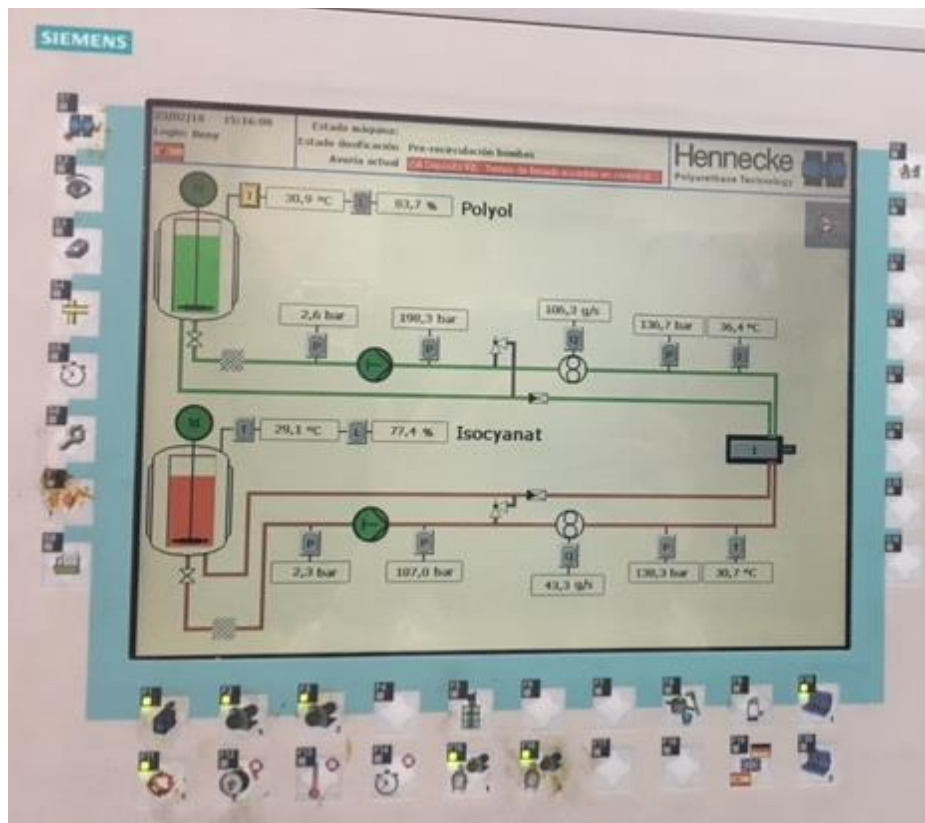


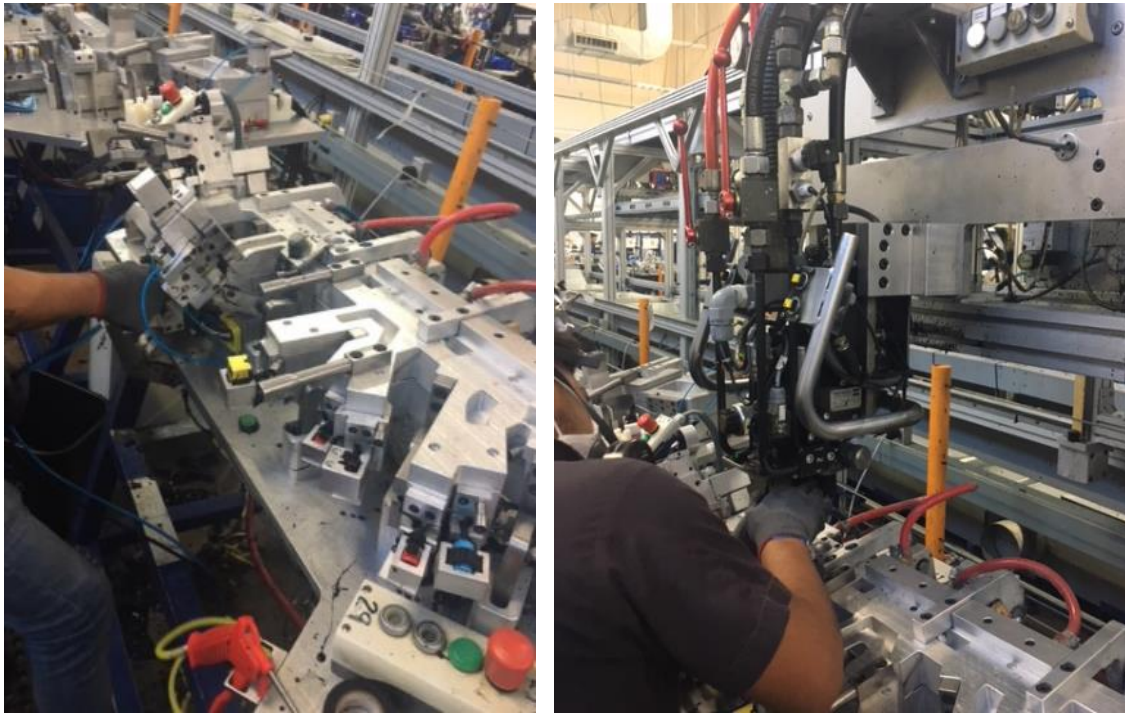
Figura 4.13. Pantalla de control de parámetros del proceso

## 4.4. Fase 4: Molde externo

En esta sección se realiza el análisis referente al proceso de inyección en el molde externo y la implementación del diseño de experimento para reducción de material desperdiciado.

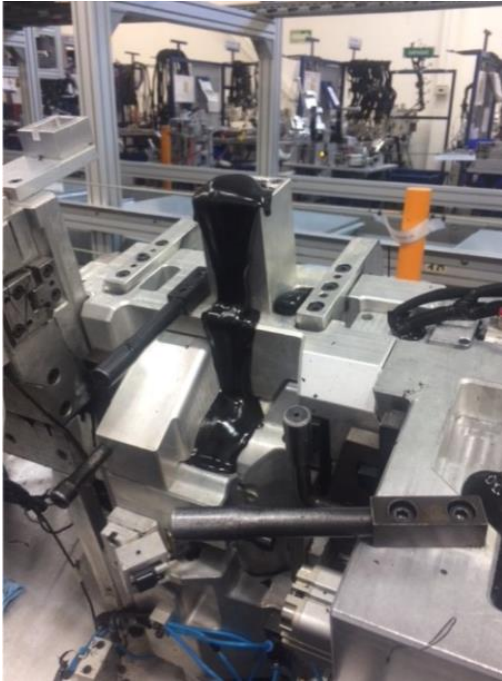
### 4.4.1. Descripción del proceso de inyección

El proceso de inicio para la inyección comienza con la preparación del molde antes de que la máquina móvil tome posición en la estación en la que se ubica. Para esto deben removerse los sobrantes adheridos al molde del arnés que fue tratado anteriormente, se rocía cera a presión sobre el molde para evitar que el foam se quede pegado después de ser inyectado, después se coloca el arnés sobre el molde y éste se cierra; con la máquina ya posicionada sobre el molde, se le coloca en la boquilla de inyección cinta de tela para evitar que se quede pegado material, después de esto se procede a inyectar el foam (ver figura 4.14).



**Figura 4.14.** Preparación del arnés e Inyección de foam

Al terminar de inyectar, la máquina prosigue su recorrido hacia otro molde ya preparado, mientras que el técnico de moldeo espera un tiempo de 3 minutos para el retiro del arnés (en esta etapa del proceso, se aplica presión en el orificio de inyección del molde para que se escape el aire atrapado dentro del molde y evitar burbujas internas). Ya que pasó el tiempo de secado, el producto es liberado con ayuda de pinzas (ya que, en ciertos casos, el material solidificado evita que el arnés sea retirado fácilmente del molde), después se procede a limpiar el molde retirando los excesos de foam adheridos al molde, lo cual nos lleva al inicio del proceso y cumpliendo con el ciclo de proceso de inyección.



**Figura 4.15.** Derrame de material en punto de inyección



**Figura 4.16.** Retiro del arnés

Cada uno de los arneses requiere un trabajo adicional de remoción de material excedente (flash) en las juntas del molde y el punto de inyección (ver figura 4.17) que es realizado con pinzas de corte. Este desperdicio se debe a que el molde presenta una separación por el que se filtra el material residual, o que el material se expandió demasiado y sobrepasó el orificio de inyección como se muestra en la figura 4.15, a su vez el exceso de material provoca que el retiro del arnés sea complicado para el operador ya que el exceso que sale por las uniones del molde provoca que se pegue el producto y se tenga que remover parte del exceso (Ver figura 4.16), ocasionando trabajo y esfuerzo adicional al operador. Normalmente la operación de retrabajo es realizada en el tiempo que el operador espera a que foam solidifique.





**Figura 4.17.** Retrabajo del arnés

#### **4.4.2. Desperdicio de material en condiciones normales**

Actualmente, el número de parte 225428100 seleccionado para la investigación, es manufacturado en el molde J1-MX13 (DAF). Para este arnés se utilizan los valores de tiempo de inyección de 5.2 segundos con una temperatura de molde de 41 °C.

#### **4.4.3. Diseño de experimento en inyección final**

A continuación, se describe el diseño de experimental a seguir, de acuerdo con la metodología planteada:

##### **1. Planeación previa del experimento**

a) Identificación y exposiciones problema: exceso de material foam desperdiciado en el proceso final de inyección

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

- Tiempo de inyección: 5.2 seg. +/- 0.2 s.
- Temperatura del molde: 41.0 +/- 4 °C
- Densidad durante la réplica 1 de 477.08 kg/m<sup>3</sup>
- Densidad durante la réplica 2 de 522.20 kg/m<sup>3</sup>

c) Selección de la variable de respuesta: gramos de material desperdiciado

2. Elección del diseño de experimento: 1 factor, 1 bloque, 2 réplicas.

Para este diseño de experimento el factor corresponde al tiempo de inyección, la temperatura del molde será el bloque y las réplicas serán a diferentes densidades, réplica 1 con densidad  $477.08 \text{ kg/m}^3$  y réplica 2 de  $522.20 \text{ kg/m}^3$ .

3. Realización del experimento

El experimento será realizado por bloques fijos aleatorizados para cada réplica. Se seleccionan 9 arneses para cada bloque al azar.

4. Análisis estadístico de los datos

a) Análisis de desperdicio de material de la variable de respuesta

La variable respuesta se mide en gramos de material desperdiciado, es decir el material excedente (flash) o derrame del mismo en el molde; cada muestra fue identificada y pesada individualmente por una báscula calibrada como se muestra en la figura 4.18, cuyos valores se observan en las tablas 4.5 y 4.6

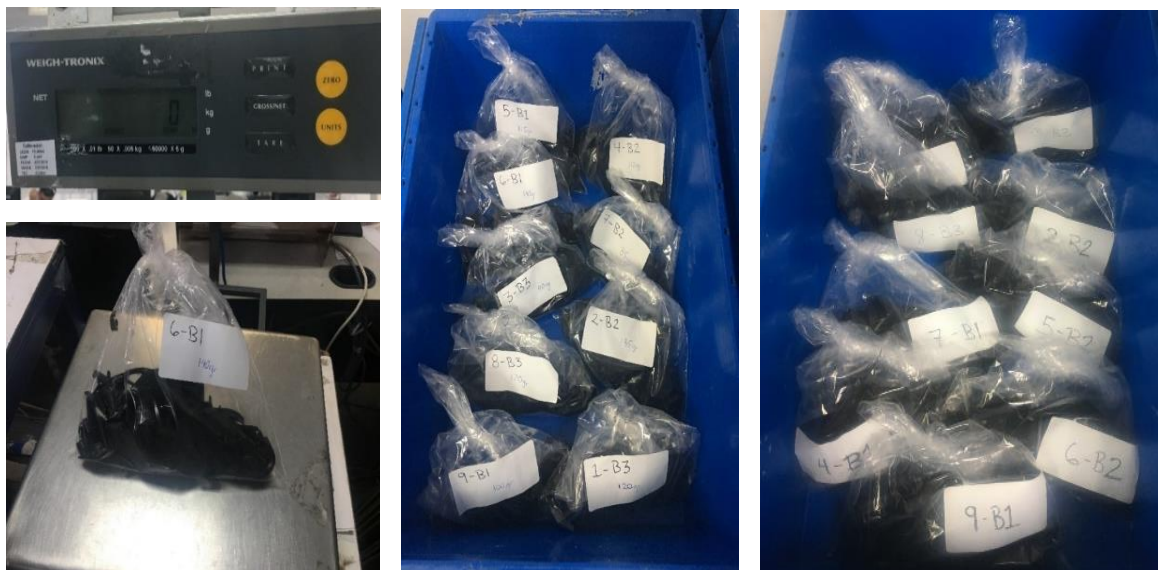


Figura 4.18. Peso de muestras réplicas

ANOVA Replica I: 477.08 kg/m <sup>3</sup>		Temperatura del molde (°C)		
		37	41	45
Tiempo de inyección (seg.)	5.0	100 (2)	85 (2)	90 (3)
	5.2	115 (1)	110 (1)	120 (2)
	5.4	140 (3)	135 (3)	120 (1)

**Tabla 4.3.** Réplica 1 de experimento con la variable de respuesta

ANOVA Replica II: 522.20 kg/m <sup>3</sup>		Temperatura del molde (°C)		
		37	41	45
Tiempo de inyección (seg.)	5.0	105 (3)	80 (2)	100 (3)
	5.2	145 (2)	105 (1)	110 (1)
	5.4	155 (1)	140 (3)	150 (2)

**Tabla 4.4.** Réplica 2 de experimento con la variable de respuesta

A partir de los valores de las tablas 4.3 y 4.4 (el valor entre paréntesis indica el orden en que se ejecutó el experimento por columna), se realizó el cálculo de la tabla 4.5 mediante las ecuaciones de la tabla 2.3 con la ayuda de Minitab versión 17, con un 99% de confianza y utilizando el método de Fisher para la comparación de medias.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	F0	$F_{0.01(2,12)}$
Tiempo	2	6536	3268	38.99	6.93
Temperatura	2	952.8	476.4		
Replica (densidad)	1	312.5	312.5		
Error	12	1005.53	83.8		
Total	17	8806.83			

**Tabla 4.5.** Análisis de varianza

Los resultados de la tabla 4.5 indican que la fuente de la variación debida al tiempo de inyección afecta a la cantidad de desperdicio observada. Esto quiere decir que hay un tiempo en el que el desperdicio promedio es mínimo. Si se ejecuta el cálculo del cuadrado medio de la temperatura entre el cuadrado medio del error se obtiene un valor de 5.68 y para el caso de la réplica se obtiene un valor de 3.73. Estos valores aunque no representan una variable aleatoria F, si dan indicación de que tanto la temperatura como las réplicas no tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.

En la gráfica de probabilidad normal (ver figura 4.19) se observa que los valores residuales se ajustan de manera muy similar a la distribución normal. En la figura 4.20 podemos observar el gráfico de comparación de pares de medias. Los resultados implican que el desperdicio medio mínimo se produce para un tiempo de 5.0 segundos y el máximo 5.4 segundos. Además, se observa de los gráficos 4.21 y 4.23 que tanto la temperatura como la densidad no tienen ningún efecto sobre el desperdicio promedio.

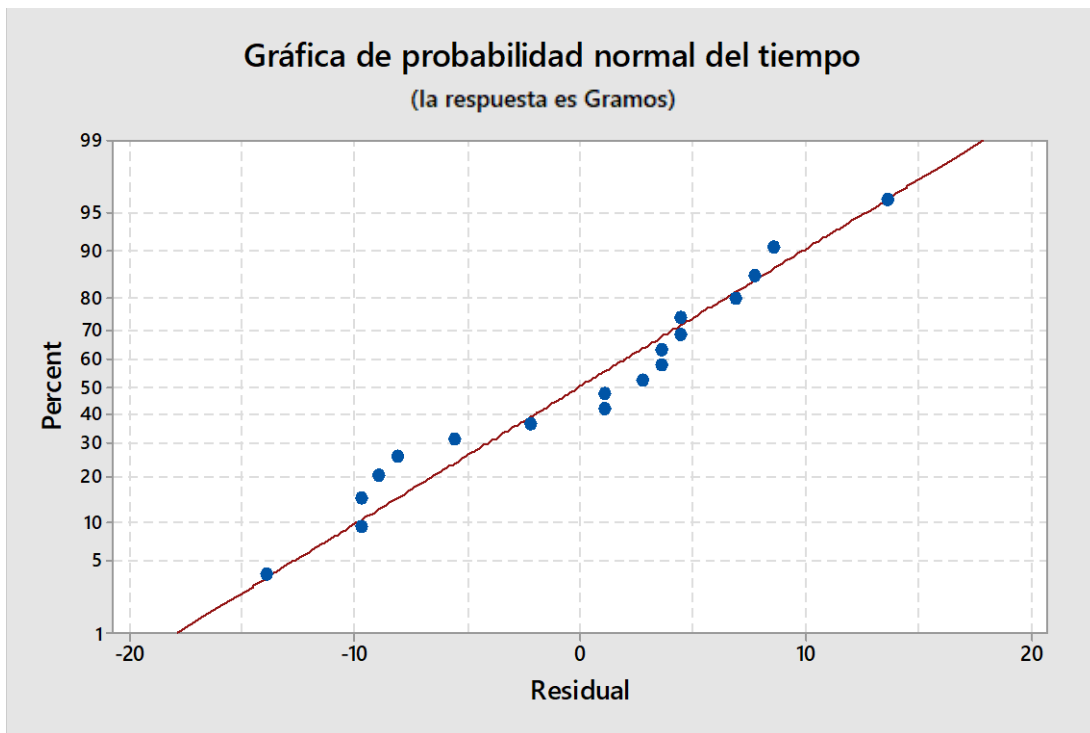


Figura 4.19. Grafica de probabilidad normal de tiempo

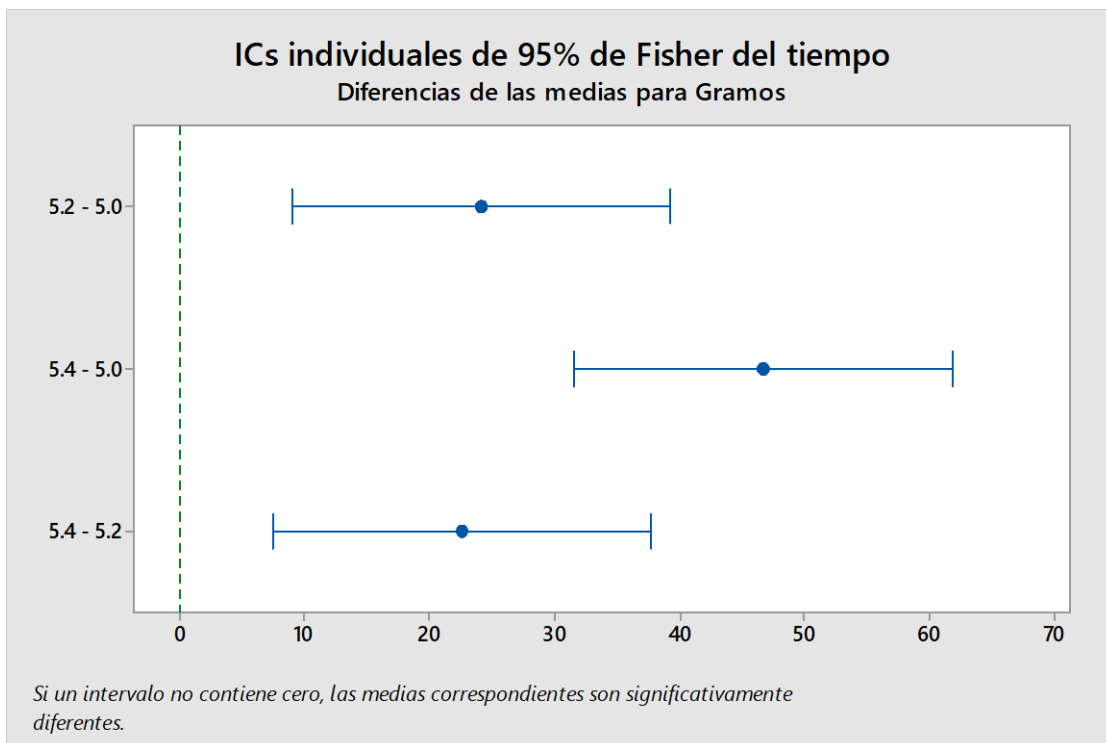
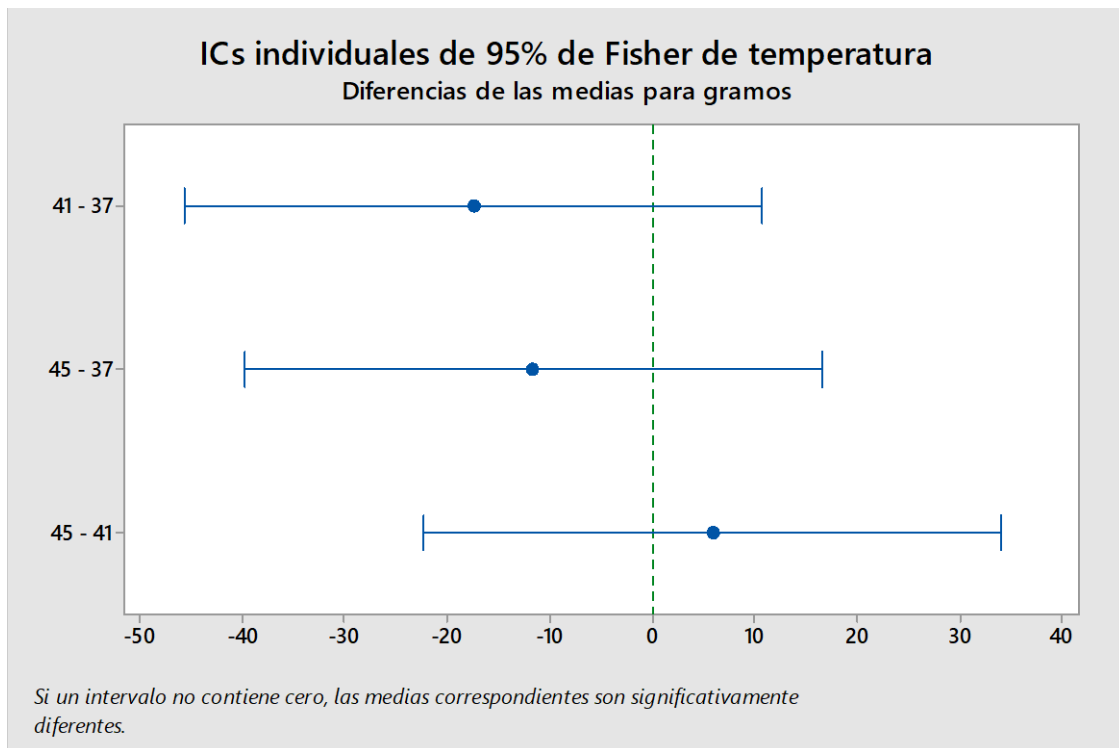
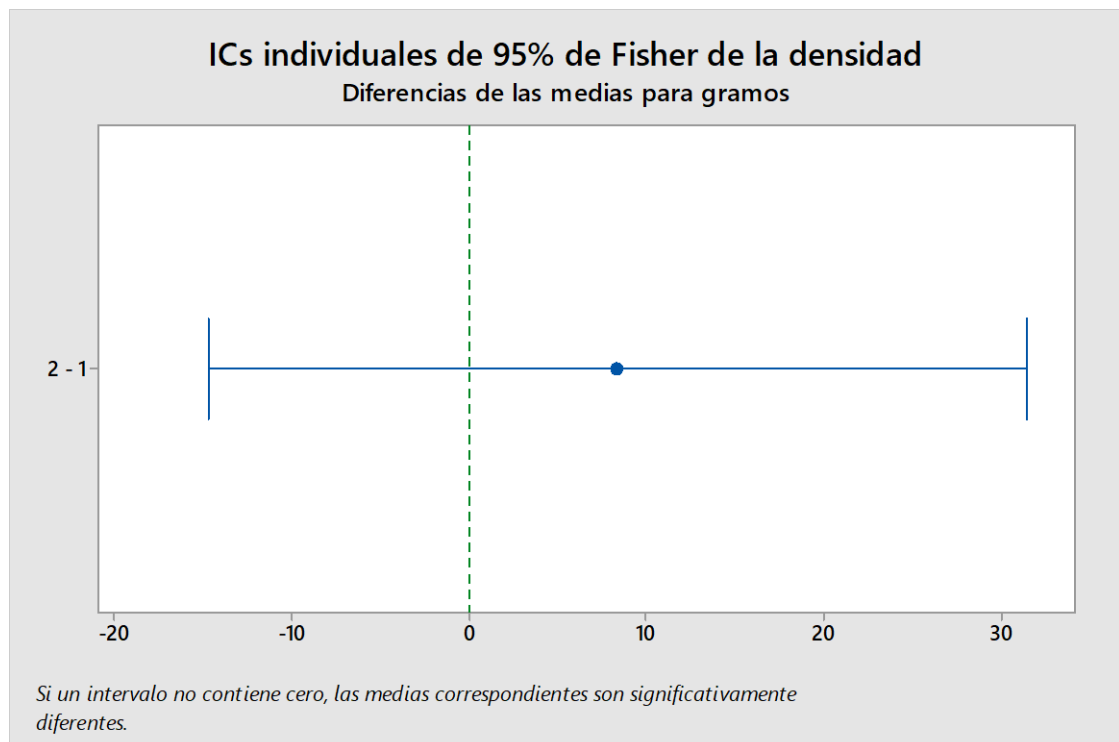


Figura 4.20. Gráfico de Fisher del tiempo



**Figura 4.21.** Gráfico de medias de Fisher de la temperatura



**Figura 4.22.** Gráfico de medias de Fisher de la densidad

## 5. Implementación de resultados

De los resultados obtenidos se refleja un ahorro de material (mezcla) cuando se reduce al mínimo el tiempo de inyección del proceso, tomando en cuenta que la densidad sea de entre 477.08 y 522.20 kg/m<sup>3</sup> con una temperatura de 41 °C del molde.

### **4.5. Fase 5: Evaluación**

Los costos de los materiales son de \$4.19 y \$3.79 dólares de ISO y POLY el Kg. c/u respectivamente, y de la proporción de los materiales para formar la mezcla (29% ISO y 71% POLY) obtenemos que el material foam tiene un costo de \$3.90 dólares el Kg; un arnés en condiciones normales (5.2 seg., 41°C) desperdicia 107.5 gr en promedio, y dado que la demanda diaria es de 40 arneses, al día se desperdician 4.3 Kg que equivalen a \$16.77 dólares en pérdidas.

Reduciendo el tiempo a 5.0 segundos con temperatura media 41°C del molde (ver tabla 4.3), observamos una media de 82.5 gr. lo que implica una reducción diaria de 25 gr. en desperdicio de material y equivale a una disminución en el costo diario de \$3.90 dólares, ya que las nuevas condiciones propuestas implican un costo de \$12.87 dólares.

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En esta investigación se llevó a cabo el análisis de un proceso de moldeo por inyección de formado de foam en una empresa maquiladora de arneses, como resultado de un ahorro de material por medio del uso de diseño de experimento.

### 5.1. Conclusiones

La importancia de análisis estadísticos dentro de los procesos es fundamental para el análisis y control; dado que existen máquinas que manejan múltiples variables que afectan directamente la calidad de los productos, sería casi imposible detectar patrones en los comportamientos de estos valores que dan respuesta a las características presentes el producto final.

Como se mencionó en capítulos anteriores, de los objetivos planteados se logró encontrar parámetros que mejoren las condiciones actuales del proceso de inyección de plástico foam. Según el análisis de densidad, mediante las cartas de control de calidad se determinó que los valores de los límites de control que mejor se ajustan son  $LC= 548.01$ ,  $LSC= 578.15$  y  $LIC= 517.88$   $kg/m^3$ , con  $\bar{s}= 18.51$ ,  $LSC= 41.94$  y  $LIC= 0$  y en base a estos valores el  $C_p$  y  $C_{pk}$  adecuados son 1.09, de esta manera el proceso queda centrado al valor medio (ver figura 4.9).

Los resultados del experimento muestran (tabla 4.5) que la fuente de la variación debida al tiempo de inyección afecta a la cantidad de desperdicio observada. Esto quiere decir que hay un tiempo en el que el desperdicio promedio es mínimo.

Para el caso de las variables temperatura del molde y densidad (réplica), si se realiza el cálculo de las F respectivas (aunque no representan tales variables aleatorias por ser restricciones) se obtienen valores de 5.68 y de 3.73 respectivamente. Estos valores brindan indicación de que tanto la temperatura como las réplicas (densidad) no tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.



De lo anterior, al reducir el tiempo a 5.0 s. con temperatura media 41°C del molde (ver tabla 4.3) se obtiene una reducción en el costo y los gramos de material desperdiciado, con un ahorro de \$3.90 dólares.

## **5.2. Recomendaciones**

Debido a las propiedades de los materiales ISO y POLY, se recomienda controlar las condiciones y especificaciones de control durante todo el flujo de proceso que recorren los componentes, ya que, de no cumplir estos pierden calidad afectando principalmente la densidad del Foam.

Las características de calidad del Foam son medidas por el cliente por atributos, para controlar la densidad la empresa estableció los límites de control superior e inferior, estos parámetros se pueden ajustar mientras el Foam no tenga problemas de flacidez o quebraduras.

## **5.3. Trabajos futuros**

Para casos de investigaciones futuras, se recomienda que se realicen estudios con el parámetro de presión de inyección, ya que la empresa no permitió modificar dicho valor para realizar el experimento por motivos de no afectar la línea productiva. Existen casos de estudio que implican que la presión influye en el desperdicio de material, por eso no se debe de descartar la posibilidad de que sea un factor influyente para el tipo de proceso y la máquina Hennecke que participaron en la presente investigación.

## 6. REFERENCIAS

- Antony, J., & Antony, J. (2001). Teaching the Taguchi method to industrial engineers. *Work Study*, 141-149.
- Arunraj, N.S., and Maiti, J. Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming. *Safety science*, 2010, vol. 48, no. 2, p. 238-247.
- Bolton, R.N. y Drew, J.H. (1994): "Linking Customer Satisfaction to Service Operations and Outcomes", en RUST, R.T. y OLIVER, R.L. (eds.): *Service Quality: New Directions in Theory and Practice*, Sage, California.
- Carmignani, G. 2017, "Scrap value stream mapping (S-VSM): a new approach to improve the supply scrap management process", *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 12, pp. 3559-3576.
- Castaño–Tostado E. Experimentos: estrategias y análisis en ciencia y tecnología, 1ª edición, México, S y G editores, 2003, p. 295.
- Chen Wu-Lin, Huang Chin-Yin and Huang Ching-Ya: Finding efficient frontier of process parameters for plastic injection molding. *Journal of Industrial Engineering International* 2013, 9:25
- Chopra, Amit., Sachdeva, Anish., and Bhardwaj, Arvind. Productivity enhancement using reliability centred maintenance in process industry. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2016, vol. 23, no. 2, p. 155-165
- Cuahuizo Lagunas, L.A. & Martinez Gonzalez, A (2007). Mantenimiento de una maquina de inyeccion de plastico dosatrice bp/c2/max.
- Curic, D., Veljkovic, Z., & Duhovnik, J. (2012). Comparison of methodologies for identification of process parameters affecting geometric deviations in plastic injection molding of housing using Taguchi method. *Mechanika*, 671-676.
- Deming, W.E. (1989): *Calidad, Productividad y competitividad*, Madrid: Díaz de Santos.

- Díaz, e. Miguel & Saldana Hernandez, (2011) P.C. Propuesta del sistema de control para una máquina de inyección de plástico.
- Dimitroff, M., Pontelli, D., Zanazzi, J.F., Conforte, J. & Zanazzi, J.L. 2016, "Mantenimiento Preventivo: Asignación Grupal de Prioridades con Metodología Procesos DRV", Ingeniería Industrial (2016).
- Escobar, L.A.; Villa, E.R. y Yáñez, S. (2003): "Confiabilidad:Historia, estado del arte y desafíos futuros", DYNA, Noviembre, Vol. 70, No. 140, pp. 5-21.
- Faulkner, W. & Badurdeen, F. 2014, "Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): a methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance", JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, vol. 85, pp. 8-18.
- García Villalpando, J., Castillo Morales, A., Ramírez Guzmán, M., Rendón Sánchez, G., & Larqué Saavedra, M. (2001). A comparison of tukey, duncan, dunnett, hsu and bechhofer. *Agrociencia* 35, 79-86.
- Hassan, H., N. Regnier, C. Le Bot y G. Defaye, 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding, *International Journal of Thermal Sciences*: 49, 161-169 (2010).
- Hassan, H., N. Regnier, C. Lebot, C. Pujos y G. Defaye, Effect of cooling system on the polymer temperature and solidification during injection molding, *Applied Thermal Engineering*: 29, 1786-1791 (2009).
- Heizer, J. and Render, B., 2004. *Principles of operations management* Pearson: Prentice-Hall, Inc.
- Huang MC, Tai CC (2001) The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature. *J Mater Process Technol* 110:1–9
- Huerga Castro, C., Blanco Alonso, P. & Abad Gonzalez, J. 2005, "Aplicacion de los graficos de control en el analisis de la calidad textil", *Pecunia*, , no. 1, pp. 125.
- Hussin, R., Mohd Saad, R., Hafiezal, M., Fairuz, M., & Hussin, R. (2013). Optimization of the Plastic Injection Molding Parameters for Sport Equipment by Using Design of Experiment. *International Review of Mechanical Engineering*, 453-462.

- Jeang, A. (1999). Robust Tolerance Desing by Response Surface Methodology. *Advance Manufacturing Technology*, 399-403.
- Ko-Ta, C., & Fu-Ping, C. (2006). Analysis of shrinkage and warpage in an injection-molded part with a thin shell feature using the response surface methodology. *Int J Adv Manuf Technol*, 468–479.
- Kurt, K., Kaynak, A., & Girit, O. (2009). Experimental investigation of plastic injection molding: assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Master Des*, 3217-3224.
- Lara-Hernández, C.; Melo-González, R.; Herrera-Ruiz, D.A.; Valdez-Gómez, J. A.; (2011). Control estadístico de procesos en tiempo real de un sistema de endulzamiento de gas amargo. Metodología y resultados. *Tecnología, Ciencia, Educación*, Julio-Diciembre, 57-74.
- M. Rother, J. Shook Learning to See: Value Stream Mapping to Add and Eliminate Muda. The Lean Enterprise Institute, Massachusetts (1999)
- Manzini, Riccardo, et al. Maintenance for industrial systems. Springer Science & Business Media, 2009.
- Mast, J., Werner, A., Ronald, J., & Edwin, R. (2000). Steps and Strategies in Process Improvement. *Quality and Reliability Engineering International*, 301-311.
- Mata-Cabrera, Francisco et al. Predicción de rugosidad en maquinado de compuestos con base de Peek usando metodología de superficie de respuesta. *Ing. invest. y tecnol.* [online]. 2013, vol.14, n.4, pp.463-474. ISSN 1405-7743.
- Ming-Tsan, C., Yung-Kuang, Y., & Yun-Hsiang, H. (2009). Modeling and Optimization of Injection Molding Process Parameters for Thin-Shell Plastic Parts. *Polymer-Plastics Technology & Engineering*, 745-753.
- Miranda Caballero, A., Shkiliova, L., Iglesias Coronel, C., & Anillo, J. (2003). Dertermination of the quantity of technical maintenances of the New Holland L 520 machines croppers rice. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 59-62.

- Montgomery, D. (2005). Diseño y Análisis de experimentos. Limusa S.A de C.V. 2da.Ed.
- Montgomery, D.C. 2005. Introduction to statistical quality control. 5a Ed. John Wiley & Sons Inc. Nueva York, NY. EEUU.
- Mosquera-Artamonov, J., Artamonova, I., & Mosquera, J. (2014). Diagnóstico del proceso de inspección mediante índices de capacidad. *Ingeniare*, 53-61.
- Navarrete, E. (1998) Control Estadístico de la Calidad. Granada: Ed. Adhara.
- Oktem , H., Erzumlu, T., & Kurtaran, H. (2005). Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *J Mater Process Technol*, 11-16.
- Ortiz Espinoza, G.P. (2014). Aplicación de un Diseño de Experimentos 2k para la Optimización de un Proceso de Moldeo por Inyección, 1-10
- Peña Cañas, L. A. (2007). Estudio para la reducción de los costos de producción mediante la automatización de los finales de línea de la planta dressing en la empresa Unilever andina Colombia Ltda. M.ScTesis, Universidad del Valle, Facultad de Ciencias Económicas, septiembre.
- Pérez Fernández, J. A. (2010). Gestión por procesos (4a ed.). Editorial ESIC, septiembre.
- Pérez, J. y Parra, C. (2007): "Evaluación y análisis de la calidad de un servicio de apoyo desde la perspectiva del usuario: primer paso hacia la confiabilidad", *Industrial Data*, enero/ junio, Vol.10, No. 1, pp. 70-79.
- Price, F. (1984): Right first time, Gower, Aldershot.
- Rausand, Marvin. Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 1998, vol. 60, no. 2, p. 121-132.
- Rosander 1992, pp. 52-59. Los datos de la encuesta Gallup realizada por al American Society for Quality Control (ACQC) en 1985 ponen de manifiesto que los clientes también son capaces de disponer medidas de la calidad de los servicios.

- Rosato, D., Rosato, D., & Rosato, M. (2000). *Injection Molding Handbook*. Kluwer Academic Publishers.
- Ruiz, N, Giret, A, Botti, V, & Fera, V 2011, 'Agent-supported simulation environment for intelligent manufacturing and warehouse management systems', *International Journal Of Production Research*, 49, 5, pp. 1469-1482
- Sampieri Roberto, Collado Carlos, Baptista Maria del Pilar (2014) *Metodología de la investigación*, 6ta. edición.
- Sánchez, V. (2002). *Moldeo por inyección de termoplásticos*. México: Limusa.
- Shuaib, N., Nasir, S., Fathullah, M., Shayfull, Z., & Abdul Manan, M. (2012). The Influence of Different Mold Temperature on Warpage in a Thin Shallow Injection Molding Process. *International Review of Mechanical Engineering*, 11-16.
- Shuaib, N., Nasir, S., Fathullah, M., Shayfull, Z., & Bahari, M. (2012). Optimization on Parameter Settings in Determining Warpage Factors of a Side-Gated Thin Shallow Part Injection Molding for PP, ABS & PC+ABS Materials. *International Review of Mechanical Engineering*, 865-870.
- Stanek, M., Manas, M., Manas, D., Kyas, K., Navratil, J., & Senkerik, V. (2011). Injection molding process and its optimization. *International DAAAM*, 155-156.
- Tanco, M., Viles, E., & Pozueta, L. (2009). Diferentes Enfoques del Diseño de Experimentos (DOE). *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, 29-37.
- Tompkins, A., 2009. *Warehouse management system technologies: transforming customer satisfaction through better inventory management*, Tompkins Associates Monograph Series. Available from: <http://www.idii.com/wp/> [Accessed 20 March 2009].
- Wang, H, Chen, S, & Xie, Y 2010, 'An RFID-based digital warehouse management system in the tobacco industry: a case study', *International Journal Of Production Research*, 48, 9, pp. 2513-2548

Wong, H. Y, K. T. Fung y F. Gao (2008), Development of a transducer for in-line and through cycle monitoring of key process and quality variables in injection molding, *Sensors and Actuators A*: 141, 712-722.

Zhao, P., Zhou, H., Li, Y., & Li, D. (2010). Process parameters optimization of injection molding using faste strip analysis as a surrogate model. *Manuf Technol*, 949-959.

# 7. ANEXOS

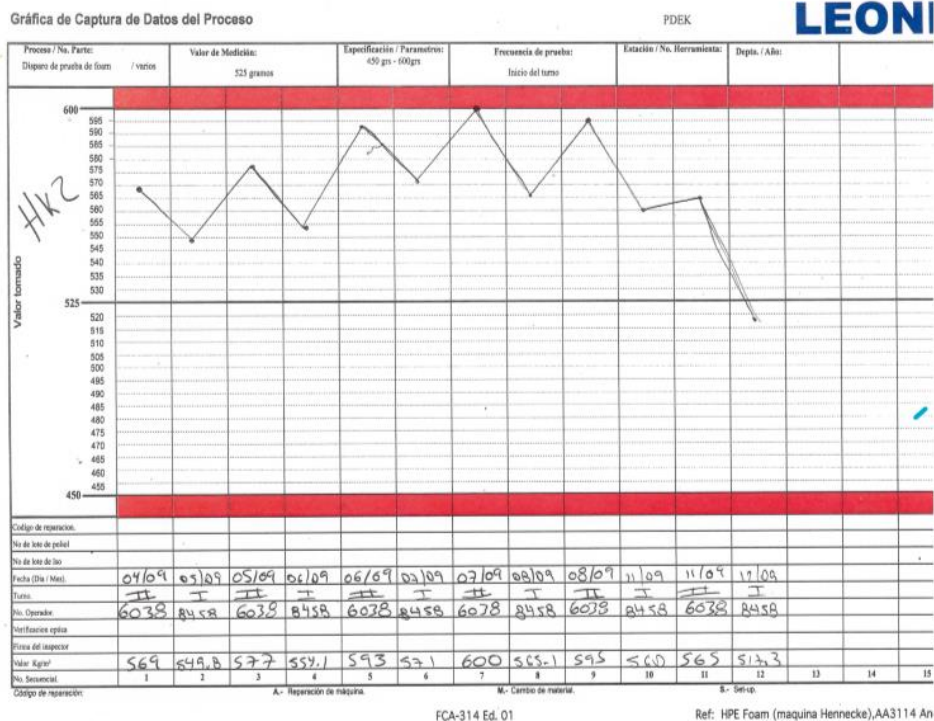


Figura 7.1. Anexo de tabla de densidades #1

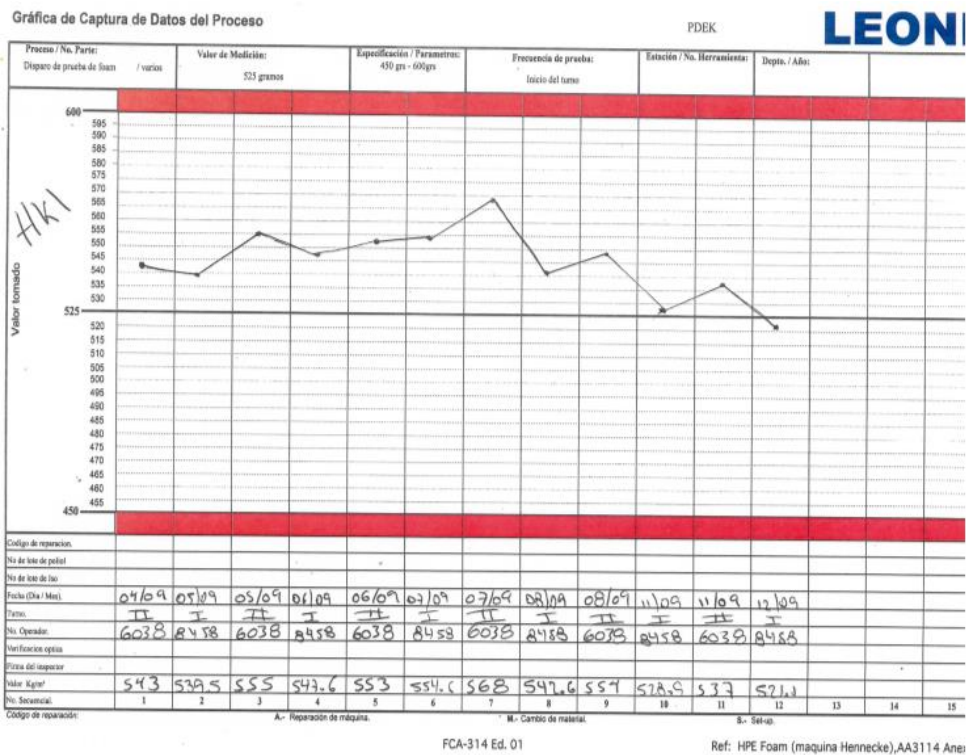


Figura 7.2. Anexo de tabla de densidades #2



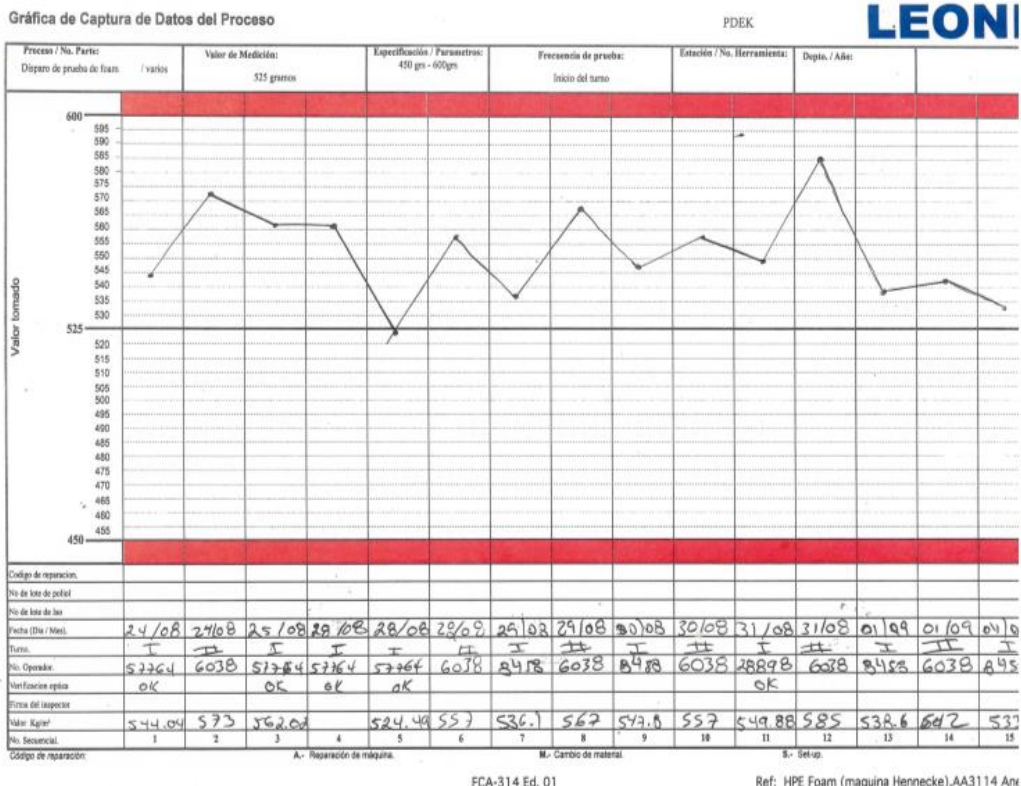


Figura 7.3. Anexo de tabla de densidades #3

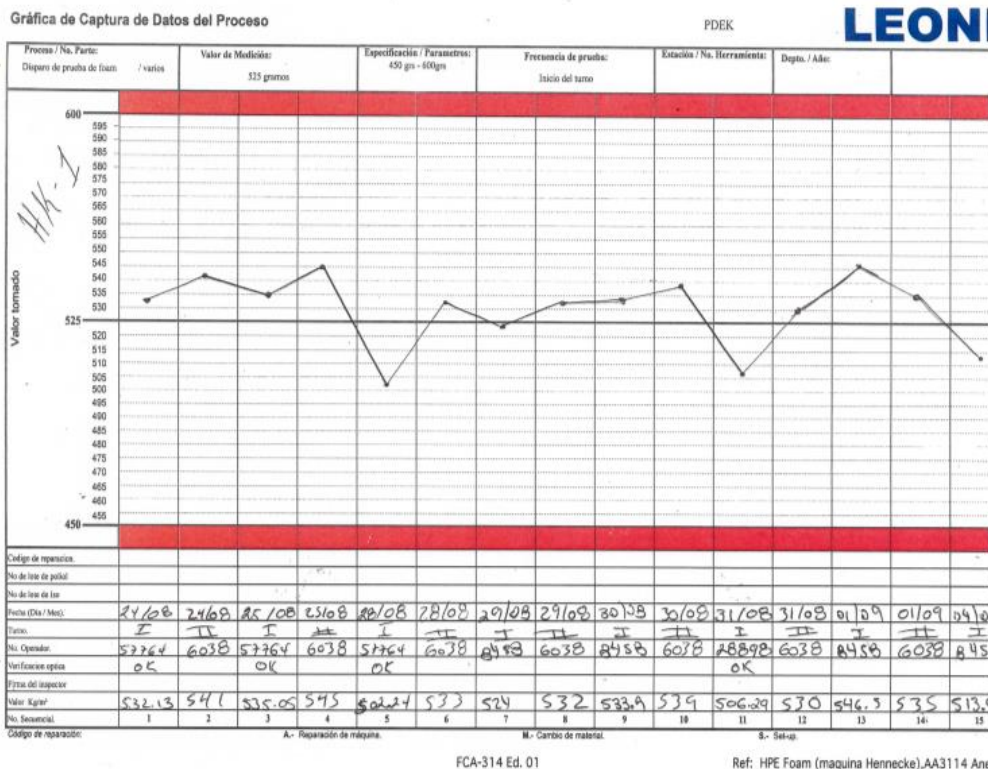


Figura 7.4. Anexo de tabla de densidades #4

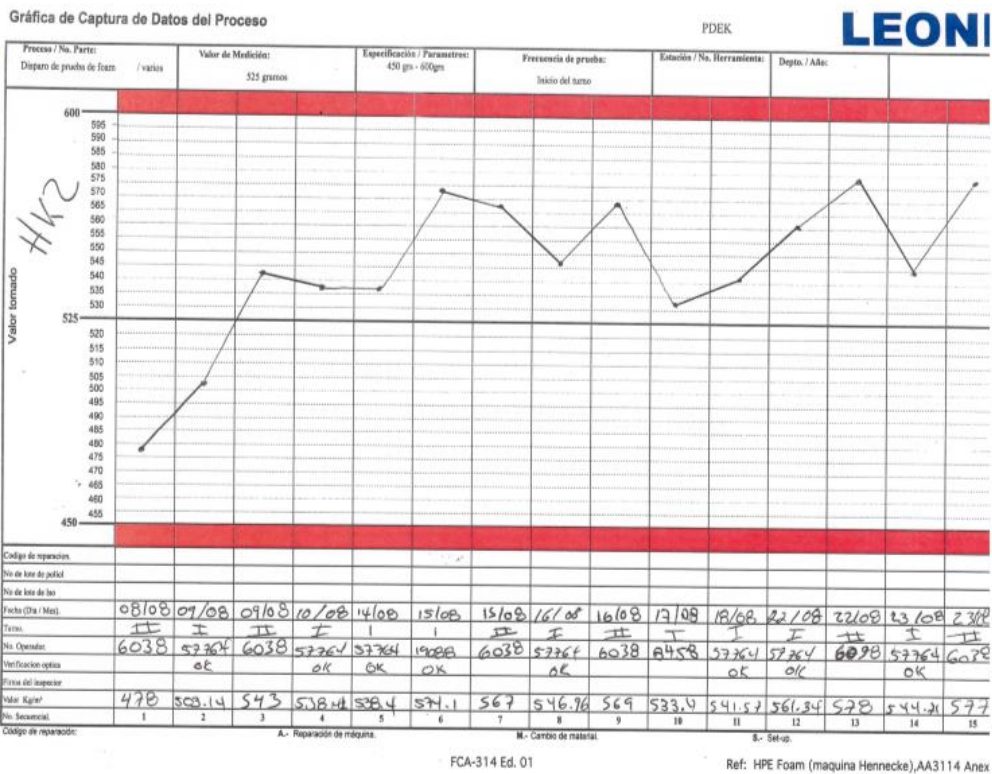


Figura 7.5. Anexo de tabla de densidades #5

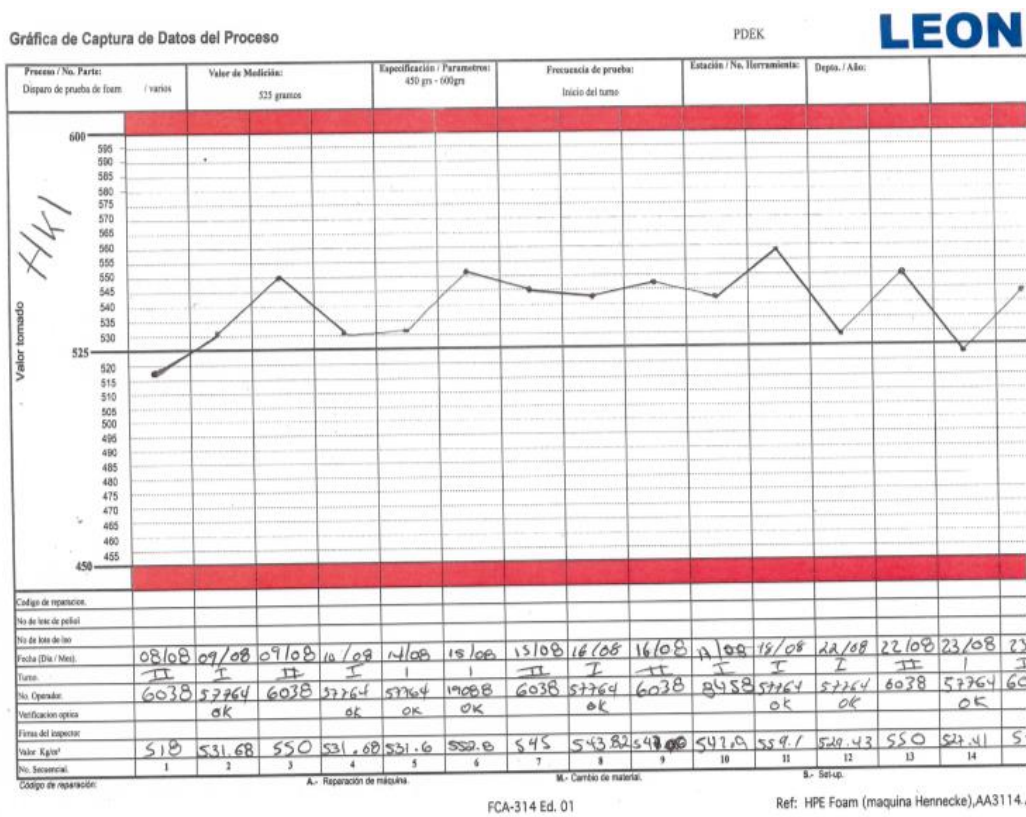


Figura 7.6. Anexo de tabla de densidades #6

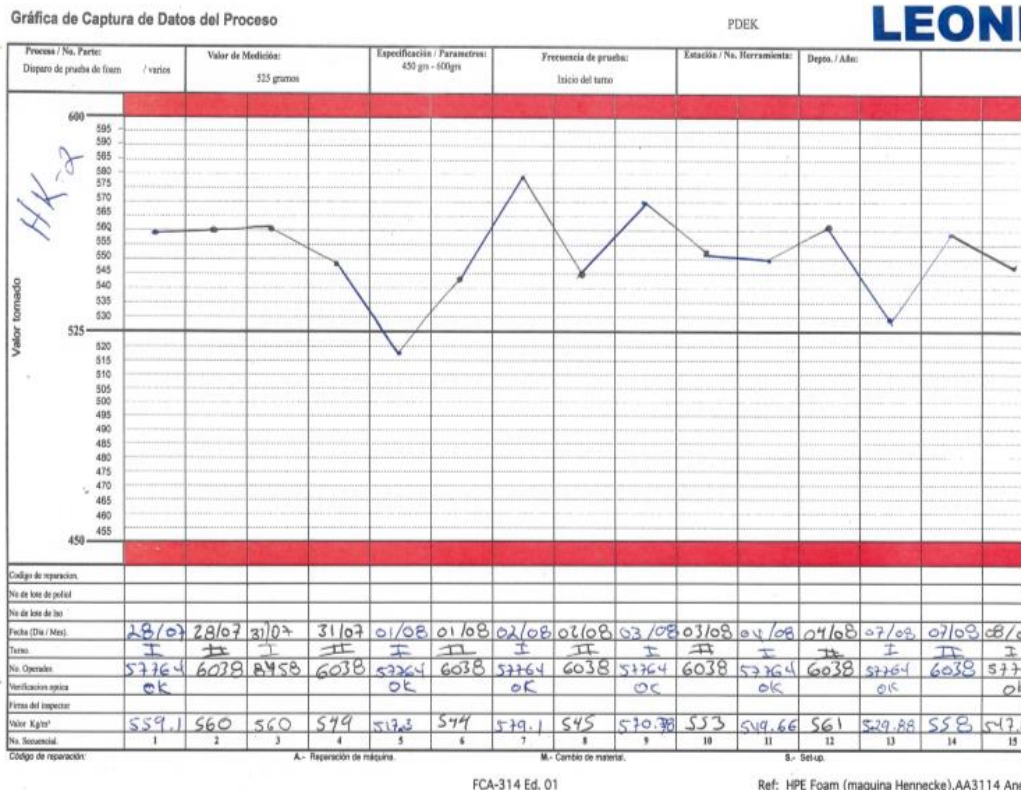


Figura 7.7. Anexo de tabla de densidades #7

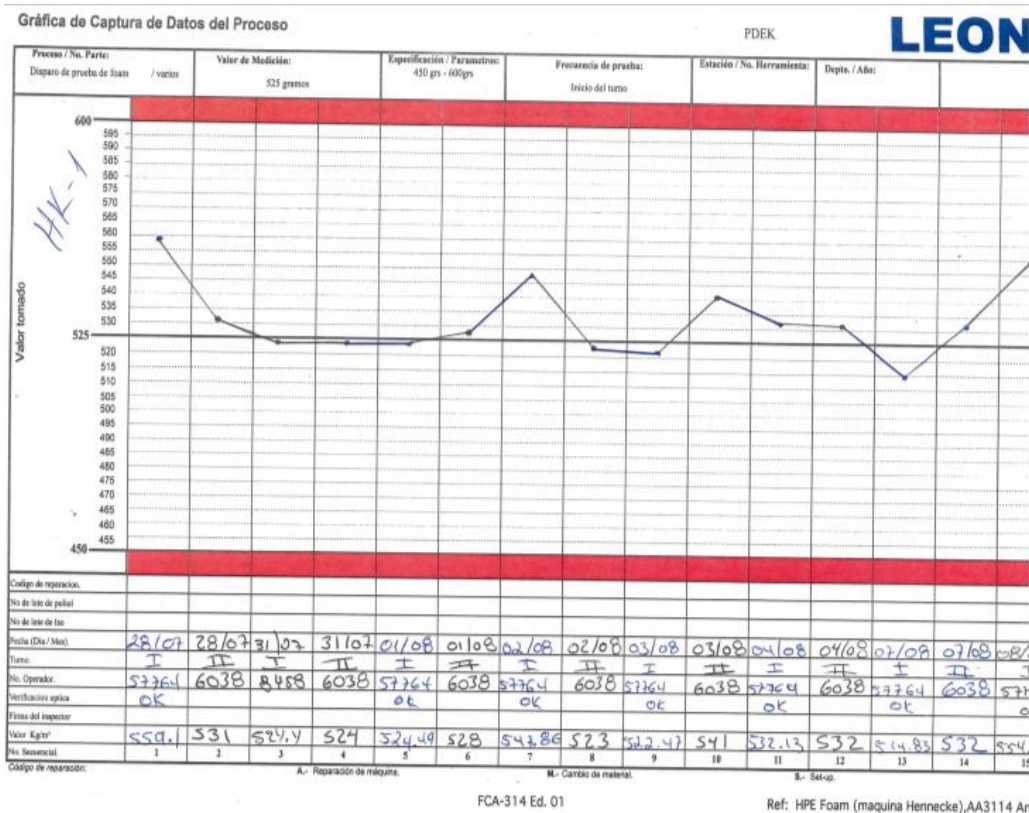


Figura 7.8. Anexo de tabla de densidades #8

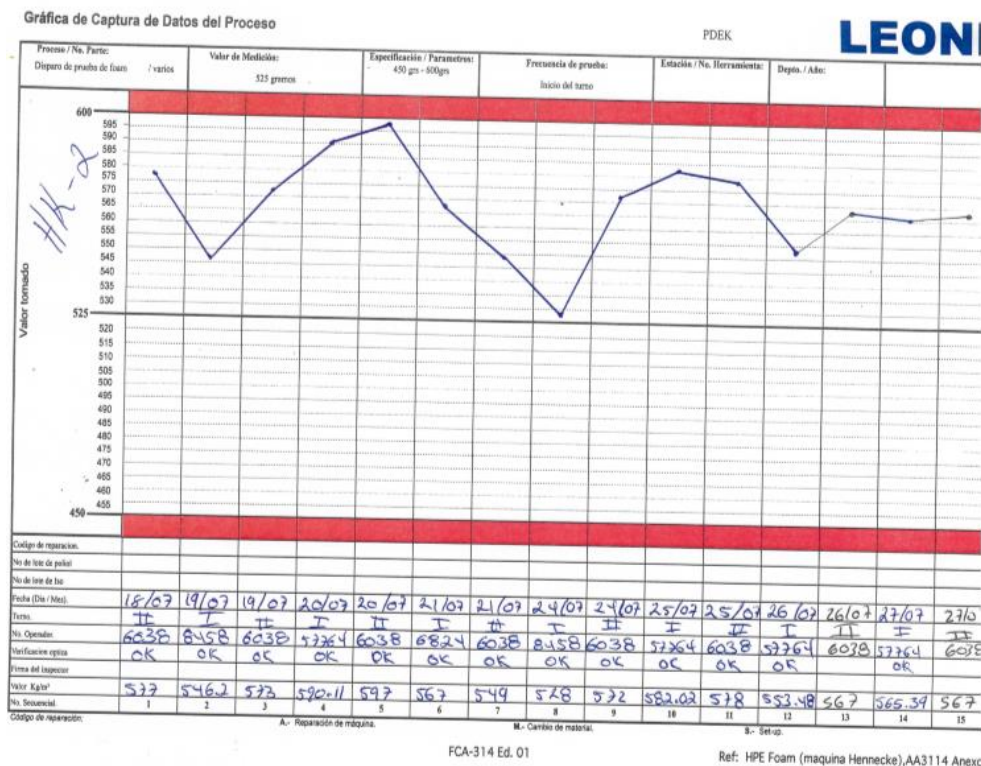


Figura 7.9. Anexo de tabla de densidades #9

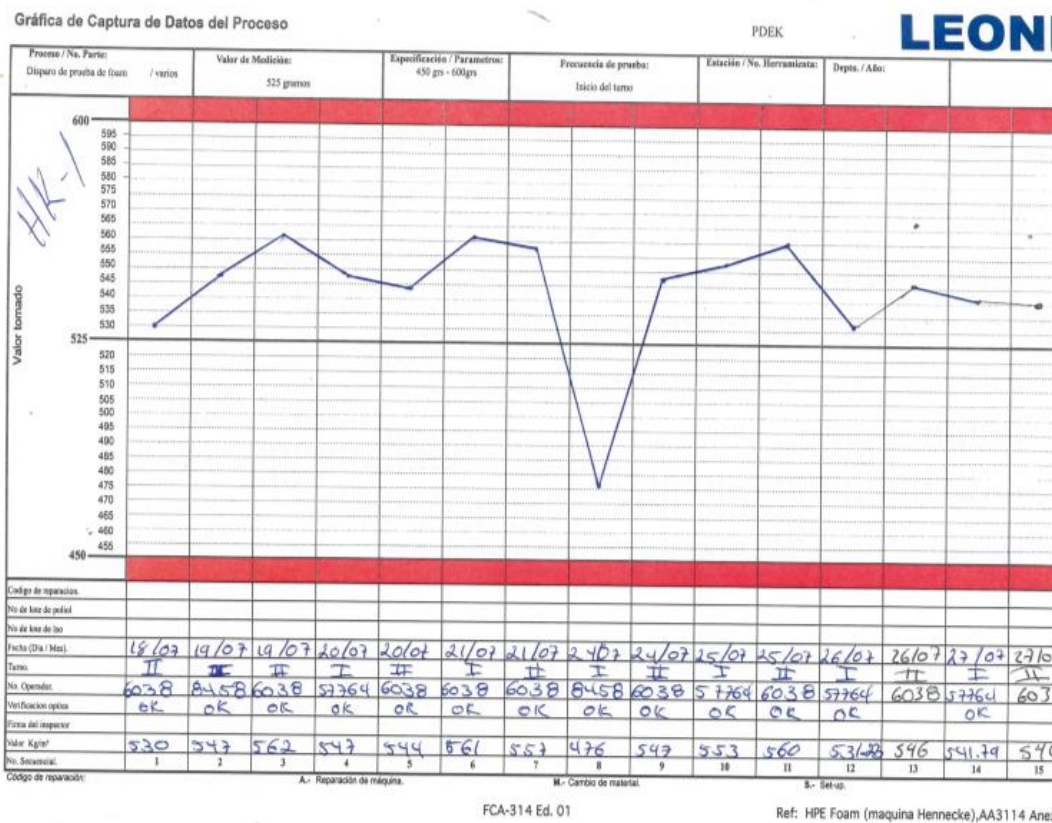


Figura 7.10. Anexo de tabla de densidades #10