

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Aplicación de metodología six sigma hasta fase de mejora para la
reducción de variación de espesor en la producción de láminas de vinil en
empresa de autopartes.**



TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

I. Q. Rogelio Fortunio Cortez.

Supervisado por:

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Georgette Rebollar Pérez.

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. José Alberto Galicia Aguilar.

H. PUEBLA DE ZARAGOZA DICIEMBRE DE 2019.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presenta la implementación de la metodología six sigma hasta la fase de mejora para reducir la variación de espesor en la producción de láminas de vinil en una empresa de autopartes ubicada en el municipio de San Miguel Xoxtla, para la selección del tema de esta tesis se contó con un acuerdo previo con la gerencia de la empresa de autopartes para obtener su aprobación para mostrar datos que no fueran considerados confidenciales.

A partir de la evaluación de la voz del cliente interno se identifica al espesor de las láminas de vinil como una característica crítica del producto ya que el no cumplir con la especificación en este parámetro implica un desempeño pobre en el proceso de termoformado y el subsecuente rechazo de la pieza. Con la conformación de un equipo de trabajo se utilizó el análisis del diagrama de Ishikawa para definir las variables críticas del proceso de producción de láminas de vinil y mediante prueba de hipótesis se seleccionan aquellas variables que muestran ser significativas estadísticamente en el espesor de la lámina de vinil. Posteriormente se aplicó un diseño de experimento y la técnica de regresión para obtener el modelo matemático que relacionara la característica del producto a controlar con sus respectivas variables de proceso seleccionadas a fin de establecer el rango óptimo en el cual se deben ajustar dichas variables para reducir la variación en el espesor de las láminas de vinil para el aislante acústico.

La principal característica de la metodología six sigma es que a partir de análisis estadístico se puede reducir la variación de los procesos de manufactura. En el caso de la producción de láminas de vinil para autopartes se identifica que hay dependencia de una característica del producto, el espesor, con respecto a las variables del proceso que afectan directamente a dicha característica.

DEDICATORIAS.

A dios, a mi padre, a mi familia y a todas las personas que han estado a mi lado apoyándome.

INDICE

CAPITULO 1	8
1 INTRODUCCIÓN.	8
1.1 Planteamiento del problema.	9
1.2 Objetivo.	10
1.3 Objetivos Específicos.	11
CAPITULO 2	12
2 MARCO TEORICO.	12
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE SIX SIGMA.	12
2.2 METODOLOGIA DMAIC.	14
2.3 FASE DE DEFINICION.	14
2.3.1 Capturando la voz del cliente.	15
2.3.2 Estrategia de Selección de Proyecto.	18
2.3.3 Integración del equipo de trabajo y los roles de los participantes.	20
2.3.3.1 Sistema de cintas.	22
2.3.4 Carta de Proyecto.	23
2.4 FASE DE MEDICION.	27
2.4.1 Identificando las variables críticas.	27
2.4.2 Colección de datos.	28
2.4.2.1 Tipo de Datos.	29
2.4.2.2 Determinación del tamaño de la muestra.	29
2.4.3 Análisis del Sistema de Medición.	30
2.4.3.1 Características de un sistema de Medición.	30
2.4.3.2 Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad.	32
2.4.3.3 Evaluación del estudio R&R.	33
2.4.3.4 Método de Rangos para el estudio R&R.	33
2.4.3.5 ANOVA para el estudio R&R.	34
2.4.4 Capacidad de Proceso.	38
2.4.4.1 Índices de Capacidad.	39
2.4.4.2 Índices C_{pi} , C_{ps} y C_{pk}	40
2.4.4.3 Índices P_p , P_{pk}	40
2.4.4.4 Índice Z.	41
2.4.5.5 Defectos por millón de oportunidades de error (DPMO).	42
2.5 FASE DE ANALISIS.	43
2.5.1 Identificación de fuentes de variación.	43
2.5.1.2 Mapeo del proceso.	44
2.5.1.3 Lluvia de Ideas.	45
2.5.1.4 Diagrama de Ishikawa.	46
2.5.1.5 Análisis de Modo y Efecto de la Falla (AMEF).	47
2.5.1.6 Matriz de Causa y Efecto.	50
2.5.2 Detección de las variables significativas.	51
2.5.2.1 Inferencia Estadística y Distribuciones de Probabilidad.	52
2.5.2.2 Intervalos de Confianza.	56
2.5.3 Pruebas de Hipótesis.	56
2.5.3.1 Hipótesis Estadística.	56

2.5.3.2 Interpretación Gráfica del Criterio de Aceptación y Rechazo.	57
2.5.3.3 Criterio de Aceptación o Rechazo.	58
2.5.3.4 Prueba de Hipótesis en Minitab®.	59
2.6 FASE DE MEJORA.	61
2.6.1 Diseño de Experimentos.	61
2.6.1.1 Clasificación de los Diseños de Experimentos.	61
2.6.2 Diseño Factorial con 2 factores.	63
2.6.2.1 Tablas de Análisis de Varianza (ANOVA).	64
2.6.2.2 Evaluación de un Diseño Factorial en Minitab®.	64
2.6.3 Modelar la relación entre las variables.	70
2.6.3.1 Modelo Matemático.	70
2.6.3.2 Análisis de Regresión en Minitab.	70
2.6.3.3 Superficie de Respuesta.	72
2.6.3.4 Análisis en Minitab® de la superficie de respuesta.	73
2.7 PROCESO DE CALANDREO DE PLÁSTICO.	75
2.7.1 Configuración de los sistemas de Calandreo.	75
2.7.2 Los rodillos de calandreo.	76
CAPITULO 3	77
3 IMPLEMENTACION Y RESULTADOS.	77
3.1 HERRAMIENTAS ESTADISTICAS UTILIZADAS.	77
3.2 FASE DE DEFINICIÓN.	78
3.3 FASE DE MEDICIÓN.	83
3.4 FASE DE ANÁLISIS.	87
3.5 FASE DE MEJORA.	100
SINTESIS.....	109
CONCLUSIONES GENERALES.	112
PERSPECTIVAS.....	113
RECOMENDACIONES.	113
ANEXO.....	115
Referencias.	118

CAPITULO 1

1 INTRODUCCIÓN.

En las industrias más competitivas el costo de los productos se ha convertido en uno de los temas de mayor interés. Manteniendo los gastos de operación al mínimo, los productos pueden producirse a un costo bajo; sin embargo, la reducción del costo debe estar garantizada con la calidad del producto de tal forma que el desempeño de la calidad no se deje al azar. Diariamente las empresas implementan proyectos de reducción de costos aplicando métodos de medición y six sigma junto con varias herramientas: el mapeo de proceso, la matriz causa y efecto y el análisis del modo de efecto de la falla AMEF están entre las herramientas más utilizadas para mejorar la calidad de los productos.

Six sigma es definido como un método sistemático y organizado para una mejora estratégica de procesos y nuevos productos que se sustenta en el método científico y técnicas estadísticas que tienen como objetivo reducir la tasa de defectos definidos por el cliente (Linderman, 2003). Six sigma posee una estructura que es considerada como un contribuyente en mejorar la calidad en el ámbito industrial, esta estructura de mejora de la calidad es conocida como DMAIC (por sus siglas en inglés: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) ya que define las fases en las cuales se desarrollan las mejoras six sigma. El método DMAIC se desarrolla en la práctica y se ha construido a partir de la agudeza en el campo de la ingeniería de calidad incorporando ideas de control estadístico de calidad y administración de la calidad.

En cada fase se incorporan las herramientas estadísticas apropiadas para analizar las mediciones obtenidas en el estudio, a fin de identificar los parámetros del proceso que afectan a las características del producto y establecer las tolerancias de tales parámetros con el objetivo de reducir la variación.

A lo largo de esta tesis se desarrollan las cuatro primeras fases de six sigma aplicadas en la reducción de variación de espesor para la lámina de vinil de aislante acústico. La decisión

de abordar esta variación usando la metodología six sigma estribó inicialmente en el resultado de un taller Kaizen realizado en Octubre 2015 en el cual se analizó el espesor obtenido a distintos valores de la velocidad de la línea observándose una relación entre ellos, a mayor velocidad de la línea el material sufría estiramiento y el espesor era menor; con este antecedente se presentó la propuesta de proyecto en la junta de asignación de proyectos six sigma de la empresa de autopartes.

1.1 Planteamiento del problema.

Uno de los aspectos más apreciados al momento de adquirir un vehículo automotor es la estética y el confort de la cabina debido que es ahí en donde el usuario interacciona con el vehículo, dentro de las características de confort que se busca en la industria automotriz se encuentra la de un espacio libre de ruido y exento de las altas temperaturas generadas en el proceso de combustión en el motor. Para lograr tal propósito los aislantes de tablero (o en inglés *dash insulator*) son montados entre el compartimiento del motor y la cabina del vehículo con el propósito de reducir la transmisión de calor y ruido hacía la cabina de conducción.

Un *dash insulator* convencional consiste en un amortiguador acústico como el poliuretano de celda abierta el cual va adherido a una lámina de un termoplástico formulado con carga mineral (Parekh, 1999). La lámina de termoplástico puede ser obtenida mediante el proceso de calandreo, o extrusión, en el cual se busca obtener un espesor determinado. El espesor de la lámina es de vital importancia ya que de él dependen propiedades mecánicas fundamentales en el *dash insulator* tales como la estabilidad dimensional, compresión, rigidez y densidad de la pieza que determinan el nivel de aislamiento al ruido y el calor.

Las características aislantes del *dash insulator* dependen en gran medida del espesor de la lámina de vinil del cual se producen ya que en caso de que el espesor fuera muy delgado el aislamiento acústico y térmico reduciría su eficiencia. El espesor de la lámina está directamente relacionado con una de las variables críticas definidas en el producto terminado que es el peso por unidad de área, de la misma forma, un espesor fuera de especificación

genera problemas en el proceso de termoformado de la lámina. El caso de un espesor por debajo de la especificación inferior (o delgado), implica el riesgo de ruptura de la lámina de vinil al momento de estirarse en el moldeo; un grosor de lámina inferior al especificado promueve la generación de hoyos en la pieza formada y cuando se expone a la estación de espumado puede ocasionar fugas de poliuretano. En caso contrario, un espesor arriba de la especificación conlleva a problemas en la adaptación de la forma de la pieza en el formado puesto que la lámina no se calienta correctamente. Adicionalmente un espesor superior implica un sobreconsumo de materiales y el encarecimiento del producto final.

En la empresa de autopartes en donde se realizó el proyecto se reportó un impacto en el costo anual de las piezas rechazadas que no se recuperan, o scrap en términos técnicos, por el defecto de lámina con espesor fuera de especificación por 64,491 dólares americanos tan sólo por el concepto de reproceso de las láminas de vinil rechazadas por tener el espesor fuera de especificación. Este impacto económico por scrap fue identificado como uno de los principales contribuyentes que afectó directamente el resultado financiero de la planta de autopartes debido a que el programa del aislante acústico es el de mayor volumen de producción. Adicional a los inconvenientes en proceso y el costo de scrap por láminas fuera de especificación de espesor, el mantener la condición de un espesor fuera de la especificación y que la lámina llegue hasta el producto final implica el riesgo de proveer un *dash insulator* que no cumpla con el desempeño acústico definido por el cliente, de acuerdo a la norma ISO 354, así como el subsecuente reclamo por parte del usuario final del vehículo, lo que compromete una posible penalización por parte del cliente.

1.2 Objetivo.

Reducir la variación de espesor en la producción de láminas de Vinil para aislante acústico en una empresa de autopartes aplicando metodología six sigma hasta la fase de mejora.

1.3 Objetivos Específicos.

- Identificar las necesidades del cliente interno y externo y mediante ellas definir el beneficio que se obtendrá con la aplicación de la metodología six sigma.
- Realizar un estudio de la capacidad de proceso para definir la reducción de defectos por millón de oportunidades.
- Definir las variables clave del proceso que influyen la variación de la lámina de aislante acústico automotriz.
- Establecer la relación de las variables clave y mediante un diseño de experimentos determinar el rango en el cual se disminuye la variación del espesor.

CAPITULO 2

2 MARCO TEORICO.

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE SIX SIGMA.

Las raíces de six sigma como un estándar de medición datan desde los estudios de Carl Frederick Gauss (1777-1855), quien introdujo el concepto de la distribución normal. Walter Shewhart introdujo el concepto de gráfica de control como una medida de variación para los resultados de un proceso en 1922 y declaró que un proceso productivo debe ser intervenido cuando el resultado de este se encuentre fuera de este límite.

La variación contenida en seis desviaciones estándar está relacionada con un desempeño de un 99.973% de resultados dentro del parámetro esperado y representa un rango de defecto de 2,600 piezas por cada millón de piezas producidas. Ese rango se consideró adecuado hasta la década de 1980. Sin embargo, en Estados Unidos dos sucesos acontecieron en esa década que requirieron mejorar el nivel de calidad de las empresas de manufactura. El primero fue la introducción de la producción en masa de artículos electrónicos tales como los transistores de radios y televisores que fueron producidos para un mercado en creciente demanda. El segundo fue la apertura de los mercados internacionales y la subsecuente introducción de artículos electrónicos japoneses dentro del mercado americano. El bajo costo y la alta calidad de los bienes producidos en Japón los convirtió en un atractivo para el mercado global (Mahesh S. Rasinghani, 2005).

Como respuesta a los cambios antes mencionados varias iniciativas de calidad se desarrollaron para hacer la producción de bienes y servicios más competitiva, algunos ejemplos de dichas iniciativas son:

- Administración de la Calidad Total. Este sistema se refiere a un método de administración dentro de las empresas para incentivar la mejora. La

particularidad de este sistema es que se promueve a través de la alta gerencia y se desarrolla definiendo un objetivo que incluyan acciones, métricos y un periodo de tiempo para concluirlos. El rol de la gerencia incluye proveer los recursos para lograr los objetivos. Sin embargo, la limitante del sistema es que en algunos casos los objetivos a implementarse no son comprendidos por todos los miembros y esto dificulta su logro.

- Círculos de Calidad. Se basa en grupos de personas generalmente de seis a doce que están orientados a hacer recomendaciones y tomar decisiones para mejorar la calidad de los procesos, el rol de la gerencia se basa en crear un ambiente propicio para que se puedan formar los círculos de calidad. La fuerza de este sistema es que reconoce al personal como el recurso más valioso.
- Kaizen. El término kaizen se compone de los vocablos japoneses *kai* que significa cambio y *zen* cuyo significado es mejora, este sistema fue desarrollado en Japón después de la segunda guerra mundial y su enfoque es básicamente hacer cambios pequeños pero constantes en el proceso a diferencia de los sistemas occidentales que están enfocados en los resultados. Dichos cambios de mejora deben orientarse a eliminar desperdicios (o *MUDA* en japonés) tales como los excesos de producción, transportación, caminado, inventario, procesos innecesarios, y retrabajos.

En la época en la cual se desarrollaban los sistemas antes mencionados Motorola enfrentaba los mismos retos que el resto de las empresas para mejorar su desempeño de calidad y descubrió que perdía una gran cantidad de sus oportunidades de negocios y productividad a partir de los costos de la no calidad. En función de ese análisis el director de Motorola, Bob Galvin, decidió que se requeriría un esfuerzo mayor para resolver los problemas de calidad. Bill Smith, un ingeniero de la empresa, descubrió que un nivel de calidad correspondiente a six sigma se traducen en un rango de defectos de 3.4 partes por cada millón de eventos o piezas producidas y propuso adoptar este nivel como estándar para la empresa. El programa para lograr este nivel fue acuñado en Motorola como “six sigma” que incluye la

mayoría de las herramientas estadísticas que se ocupan actualmente en dicha metodología. De forma circunstancial “six sigma” es una marca registrada de Motorola (Mc Clusky, 2000).

2.2 METODOLOGIA DMAIC.

Six sigma está basada en una serie de pasos estructurados denominados *DMAIC* (por sus iniciales en inglés *Define, Measure, Analyze, Improve y Control*). *DMAIC* es una estrategia basada en el análisis y toma de datos que se usa para el proceso de mejora, es parte integral del proceso six sigma. Sin embargo, se puede implementar en general como un procedimiento de la mejora de la calidad o como parte de otras iniciativas de mejora de procesos tal como *Lean Manufacturing* (Borrow, 2009). A continuación, se definen los pasos que componen las fases de DMAIC.

2.3 FASE DE DEFINICION.

La fase de *Definición* es la primera en la ejecución del proyecto six sigma y sus objetivos primordiales son: definir el proyecto con todos sus detalles que incluyen el título del proyecto, el objetivo, el alcance, la composición del equipo de trabajo y el beneficio esperado en términos de los requerimientos del cliente. El objetivo es crear un sentido de pertenencia del proyecto, así como prevenir una idea ambigua del proyecto entre el líder y los integrantes del equipo (Schoerer, 1999).

En esta fase se deben hacer las siguientes preguntas:

1. ¿Quién es el cliente interno o externo?
2. ¿Cuál es la carta del proyecto?
3. ¿Cuáles son los límites del proceso?

2.3.1 Capturando la voz del cliente.

Para poder definir un proyecto antes se deben conocer las expectativas, preferencias o comentarios de un producto o servicio, a esta serie de necesidades se le denomina *la voz del cliente* y se pueden identificar dos tipos de clientes:

- Clientes Internos. Son aquellos clientes inherentes a la organización y pueden ser gerentes, empleados o cualquier departamento funcional.
- Clientes externos: Son aquellos clientes que no son parte de la organización y que usan o compran los productos o servicios, o bien las personas que tienen intereses en la organización tal como los accionistas (Pandey, 2006).

La voz del cliente se usa para capturar las necesidades tanto las declaradas como aquellas no declaradas o latentes y se puede clasificar en cuatro categorías:

- La voz del Asociado. Es la retroalimentación obtenida de los empleados.
- La voz del inversionista. Es la retroalimentación de los administradores o inversionistas.
- La voz del cliente externo. Es la retroalimentación de nuestros clientes finales.
- La voz del proceso. Es la retroalimentación que obtenemos al medir los indicadores clave del proceso o los puntos críticos de calidad.

Del mismo modo para poder captar las necesidades declaradas y latentes podemos ocupar las siguientes herramientas:

- Encuestas. Son un conjunto diseñado de cuestionarios que se envían a los clientes potenciales o existentes; es un método muy rentable, sin embargo, tiene una tasa baja de respuesta.

- Entrevistas. Son reuniones individuales con los clientes potenciales o existentes en las que una serie de preguntas y respuestas se discuten para entender la opinión de los clientes.
- Sesiones de Grupo. Se reúne un grupo de personas para llevar a cabo una discusión sobre temas específicos a abordarse, estos grupos son excelentes para la identificación de los temas críticos de calidad.
- Sugerencias. Se basa en recoger los comentarios o propuestas de los clientes, ofrece una buena oportunidad de mejora.
- Observaciones. Durante el curso del proceso las personas pueden tener observaciones y puede proporcionar información al proceso que actúe como voz del cliente (Six Sigma Institute, 2015).

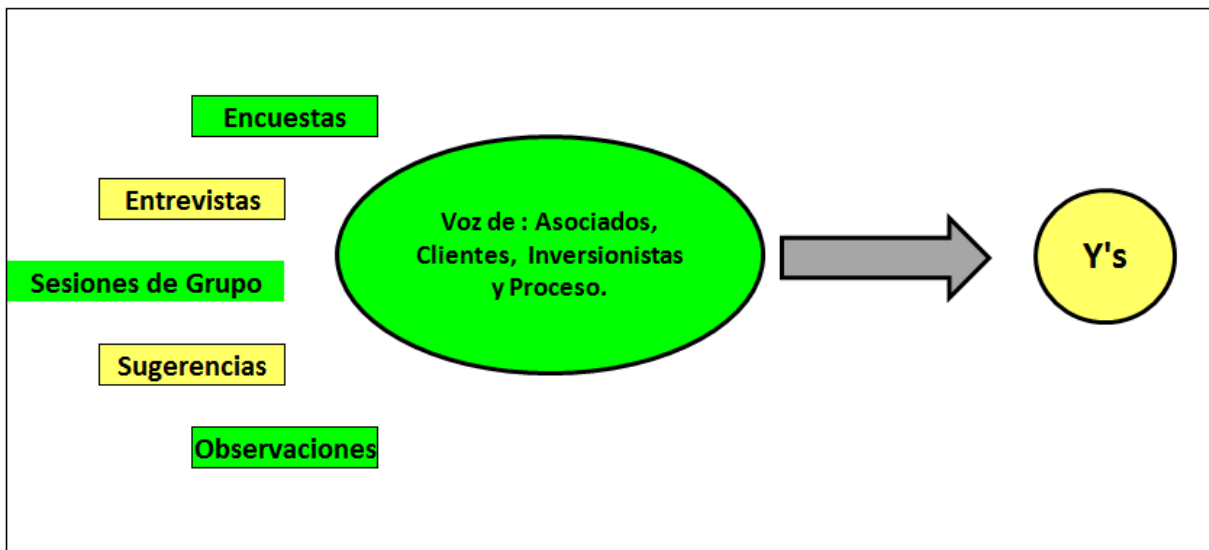


Figura 1. Herramientas de la voz del cliente para identificar las necesidades del cliente (Y's).

Tal como se observa en la Figura 1 después de utilizar las herramientas antes citadas se analiza la información obtenida y de esta forma se identifican las necesidades del cliente que comúnmente en la aplicación de six sigma se representa con la letra “Y”. Las características

obtenidas (Y's) se traducen en características críticas de satisfacción relacionadas con la calidad, la entrega, el costo, la seguridad y el medio ambiente.

Para el caso de la empresa de autopartes en la cual se aplicó este proyecto de tesis se realizaron juntas diarias denominadas juntas de operaciones; en ellas se analizaron los distintos indicadores clave (*KPI* por sus siglas en inglés) entre los que se encuentran la disponibilidad del equipo, el porcentaje de rechazos, la eficiencia del equipo y la eficiencia global de las líneas productivas y se hace un reporte por cada línea de trabajo. En el caso de la producción de la lámina de vinil se identifica como cliente interno al proceso de termoformado del *dash insulator* y la voz del cliente se escucha a partir de los reportes de rechazos de calidad para la línea de producción por lo que se identifica como voz del cliente al proceso. El reporte mostrado en la Figura 2 (a) indica en la parte superior el porcentaje de rechazo en el proceso de termoformado el cual equivale a un 10.3%; asimismo, en la Figura 2 (b) se detallan las causas de rechazo en la estación de termoformado en donde se aprecia el defecto de lámina fuera de especificación en el espesor.

DE	A	LAMINAS ALIMENTADAS	RECHAZOS FORMADO	RECHAZOS DE ESPUMADO #2	RECHAZOS DE ESPUMADO #3	RECHAZOS DE ESPUMADO #4	RECHAZOS DE ESPUMADO #5	TOTAL RECHAZOS ESPUMADO	PIEZAS PRODUCIDAS EN PT. OK	RECHAZOS PT	PRODUCCION TOTAL
22:00	23:00	50	0	4	2	3	2	11	10	2	23
23:00	00:00	90	5					0	88	2	95
00:00	01:00	100	4	2	3	3	2	10	90	2	106
01:00	02:00	100	4	3	3	3	2	11	77	2	94
02:00	03:00	80	15	3	2	5	3	13	70	7	105
03:00	04:00	40	3	3	3	4	3	13	20	2	38
04:00	05:00	100	17	3	3		4	10	58	8	93
05:00	06:00	100	17	4	4		4	12	50	3	82
06:00	07:00	80	9	3	3		3	9	55	4	77
TOTALES		720	74	25	23	18	23	89	518	32	713
% RECHAZO		10.3%			13.8%				6.2%		
Piezas inyectadas				7	7	7	2				
Piezas sin inyección				18	16	11	21				

Figura 2. (a) Reporte de rechazos de la producción del dash insulator en la estación de formado, marcado en ovalo rojo

Producto	% de scrap	Problema	Acción	OK	RX
B02A	0.42%	> Pieza con bolsa	> Se ajustaron temperaturas	240	1
WHEEL HOUSE	1.56%	> Piezas desplazadas y ajuste de cortes	> Se realiza ajustes por cambio de herramienta y reparacion de molde de corte por mto.(perforacion de la pieza)	192	3
X02B	0.00%	> Sin problemas		232	0
CD-4 CHARCOAL	2.44%	> Piezas incompletas > Piezas con marca en la alfombra proveedor	> Reacomodo de azdel en alimentacion	450	11
K2XX	6.18%	> Piezas se abren en formado	> Estan entrando laminas calientes al formado con 40° a 53° en alimentacion se van ajustando temperaturas ademas estan entrando laminas con grumos en la lamina	518	32
K2XX EN LINEA 5	6.62%	> Piezas mal formadas y delgadas se abren	> Laminas delgadas del cierre y lamina caliente se adelgaza y se abre al formar	408	27
BANBURY			> Se mete granulado apelmazado provocando grumos en la lamina se agrega 9 kilos de dotp pero sigue siendo notoreo		

Figura 2. (b) Reporte de rechazos del cliente interno de la lámina de vinil, proceso de termoformado del *dash insulator*; el óvalo en rojo remarca los problemas debido a lámina delgada

2.3.2 Estrategia de Selección de Proyecto.

Una vez que la voz del cliente se identifica podemos saber si tenemos un área de oportunidad que esté afectando el cumplimiento de los objetivos establecidos por la planta, sean esta productividad, porcentaje de rechazos, disponibilidad del equipo, entre otros. De acuerdo con la Figura 2 (a) el proceso de termoformado reporta un porcentaje de rechazo de 10.3% lo cual sobrepasa el porcentaje de rechazo máximo permitido por la planta establecido en 1.5%. En este punto encontramos mediante la voz del cliente una necesidad que nuestro cliente interno nos estaba reportando. El siguiente paso fue definir si podíamos cumplir esa necesidad aplicando un proyecto six sigma. Para tal efecto la planta debió definir una estrategia de selección de proyectos mediante mecanismos para identificar los proyectos six sigma. Estos mecanismos en ocasiones son llamados filtros de proyecto y deben involucrar a la gerencia de la planta para determinar los proyectos cuyo impacto financiero es estratégico para la organización (Carmell, 2003). La empresa de autopartes en la cual se realizó el proyecto consideró los siguientes filtros para la determinación del control de espesores la lámina de vinil como un proyecto six sigma:

1. La oportunidad encontrada no tiene una solución obvia o conocida.

2. Debe tener un defecto o problema (designada con la letra “y”). En el caso del proyecto de esta tesis el defecto es la variación de espesores de la lámina de vinil.
3. Debe tener contribuidores o causas de ese defecto (designados con la letra “x”). Se identifican a variables del proceso de la producción de láminas tales como la velocidad de producción o la temperatura en la que se procesa el vinil, entre otros.
4. El objetivo del proyecto debe estar relacionado con la reducción de variación, defectos o tiempo ciclo. Para el proyecto de esta tesis se considera reducción de variación de espesores de la lámina de vinil.
5. Se debe enfocar en mejorar los procesos existentes antes que rediseñarlos.
6. Tener un impacto positivo y medible para el cliente. Para el proyecto de reducción de variación de espesor de láminas de vinil el impacto para el cliente interno es la reducción en el rechazo en el termoformado de la lámina y es medible de acuerdo con el porcentaje que reportó el departamento de calidad.

Los puntos anteriormente mencionados fueron consensados en la junta de revisión de proyectos six sigma realizada en la planta de autopartes el día 28 de enero de 2015 y se tuvo la participación del gerente de la planta, así como de los gerentes de los departamentos de Ingeniería, Producción, Mantenimiento, Logística, Materiales, Calidad, así como al Ingeniero de Mejora Continua. La Figura 3 muestra la minuta de la junta en la cual se definió que la reducción de variación de espesores de la lámina de vinil para la producción de aislante acústico cumplía con los filtros para ser considerado un proyecto six sigma.

MINUTA REUNIÓN SIX SIGMA	
Lugar y Fecha	<u>Sala de Capacitacion, Miercoles 28 de Enero de 2015</u>
Hora de Inicio	<u>1:00 PM</u>
Objetivo de la Reunión	<u>Revisar el status de los Proyectos Six Sigma Black Belt y Green Belt.</u>
Asuntos a tratar:	
Orden del día.	
1	Revisión Definición Proyecto de reducción de variación en espesores
Acuerdos	
1	Se revisan los criterios de six sigma para definir el proyecto de reducción de variación de espesores como un proyecto six sigma
2	Próxima junta definir el proyecto de Arturo Rodriguez
3	Siguiente semana Revisión Proyecto León Reyes
Otros Asuntos	
Puntos a tratar en la próxima Reunion	
Reporte breve de todos los proyectos al staff e informar el apoyo que se requiera a los mismos	
Reporte de Proyectos Green Belt	
Próxima reunión Miércoles 4 de Febrero de 2015	

Figura 3. Minuta de la junta six sigma en la empresa de autopartes en la cual se acordó que el proyecto de reducción de variación de espesores sería abordado con metodología six sigma.

2.3.3 Integración del equipo de trabajo y los roles de los participantes.

En las organizaciones generalmente se conforman dos clases de equipos de trabajo los cuales se pueden dividir en equipos formales e informales. Los equipos formales tienen un objetivo específico que está ligado a los planes de la organización, además también contemplan dentro de su formación una carta de proyecto que incluye la declaración de su misión, la lista de los integrantes del equipo, así como una declaración del apoyo de la gerencia en las actividades del equipo. Los equipos informales usualmente no contemplan ninguna de las consideraciones anteriores y su pertenencia depende de las necesidades propias de los departamentos que los conforman más que del logro de un objetivo determinado (Muralidharan, 2012). Por las características de los objetivos que se buscan en six sigma el desarrollo de los proyectos requiere de equipos formales de trabajo.

También se considera que los equipos trabajan mejor cuando cada miembro tiene asignado un rol, un trabajo específico y todos entienden la dinámica y dichos roles dentro del equipo. Son cinco los roles asignados para el personal dentro de un proyecto six sigma de acuerdo con Kubiak (2010) y sus responsabilidades se pueden resumir de la siguiente manera:

Staff Gerencial. Se conforma por los gerentes de la organización los cuales deben entender la relevancia de los proyectos six sigma, así como también tienen la facultad de delegar estos proyectos ya que su perfil incluye la definición de responsabilidades a los miembros del equipo y el suministro de los recursos necesarios para su ejecución, así como la revisión del progreso de los proyectos.

El Dueño del proceso. Es la persona responsable del proceso, quien reporta directamente el desempeño actual del proceso y quien administra los recursos del mismo; es quien al final de la mejora administrará los cambios en el proceso con el objetivo de crear valor tanto al cliente interno como al externo.

El Líder del Proyecto. Se le considera la entidad autorizada para tener comunicación directa con el dueño del proceso, así como con los miembros del equipo para poder comunicar los objetivos del proyecto y de la misma forma gestionar los recursos necesarios para las actividades requeridas. El líder del proyecto debe tomar la responsabilidad primaria para las actividades y resultado de este; no sólo se debe enfocar en el diseño o rediseño del proceso, también tiene que esforzarse por enlazar las actividades six sigma a los sistemas de la voz del cliente y su satisfacción. Dentro de sus responsabilidades específicas están las siguientes actividades:

- ❖ Revisar y clarificar el proyecto con el dueño del proceso.
- ❖ Desarrollar y actualizar la carta de proyecto.
- ❖ Ayudar a seleccionar a los miembros del proyecto.
- ❖ Identificar y gestionar recursos e información del proyecto.

- ❖ Dar seguimiento al proyecto de acuerdo con el cronograma definido con los miembros del equipo.
- ❖ Documentar el resultado final y realizar un resumen del proyecto.

El Mentor Six Sigma. El mentor es el experto que provee de consejos y asistencia técnica para el proyecto en áreas que pueden ir desde conceptos de estadística hasta el diseño de estrategias lo cual requiere que sea experto en six sigma. Dentro de sus responsabilidades también se incluye la de resolver los conflictos entre los miembros del equipo, analizar los datos acumulados, así como el de la promoción del equipo que trabaja en el proyecto y su reconocimiento.

Los miembros del equipo. Son los integrantes del equipo que desarrollan el proyecto hasta su conclusión. Pueden provenir de varios departamentos que estén involucrados en el proceso y se les puede considerar el principal soporte detrás de la medición, el análisis y la mejora de los procesos. Ellos comunican ideas, aportan su experiencia en el proceso y realizan acciones encomendadas en el desarrollo del proyecto.

2.3.3.1 Sistema de cintas.

Six sigma también hace el uso de categorías denominadas “cinta” (o *belt* en inglés) para el personal involucrado en el proyecto, los roles y responsabilidades también pueden ser asignadas a través de esa categorización de “cintas”. Este sistema consta de certificaciones personales basadas en el conocimiento de estadística y la realización de proyectos six sigma (Pande, 2003). A continuación, se definen cada una de estas categorías de cintas

- **Cinta Verde (Green Belt):** Un cinta verde trabaja directamente con el personal en piso y es responsable de la colección de datos, hacer las interpretaciones iniciales y formula recomendaciones a las cintas negras.
- **Cinta Negra (Black Belt):** Es un líder del equipo six sigma el cual está entrenado en el proceso DMAIC, generalmente realiza el análisis riguroso de estadística con la información y datos recabados durante el proyecto.

- **Cinta Negra Maestra (Master Black Belt):** Es el responsable de entrenar a las cintas negras y asesorarlas en todo momento, debe contar con amplia experiencia en la metodología DMAIC, así como en el uso de la estadística. Una cinta negra maestra puede ser una cinta negra entrenada para esa función o un consultor externo a la organización.

En la Tabla 1 se indica el perfil en el nivel de cintas que es deseable para cada rol genérico de six sigma de acuerdo a las actividades a desempeñar:

ROL GENERICO	SISTEMA DE CINTAS BELT
Staff Gerencial	Comité de seguimiento six sigma
Dueño del proceso	Cinta Negra, Gerente del área
Líder del Proyecto	Cinta Negra, Cinta Negra Maestra
Mentor six sigma	Cinta Negra Maestra
Miembros del equipo	Miembros del equipo, Cinta Verde

Tabla 1. Relación entre el Sistema de Roles y el de Título de “cintas”. Tomado de (Muralidharan, 2012).

2.3.4 Carta de Proyecto.

Una vez que se consensa sobre la pertinencia de abordar un problema utilizando la metodología six sigma es necesario definir los alcances y objetivos de este; para ello, se realiza una carta de proyecto (*Project charter*, en inglés). La realización de la carta de proyecto es un elemento muy importante ya que no sólo indica quienes son los miembros del equipo del proyecto sino también el compromiso de la gerencia para su realización (Bidanda, 2008). Además, la carta de proyecto ayuda a todos los miembros de la organización a entender los detalles del mismo y mantiene al equipo del proyecto enfocado en los objetivos que se han establecido, los formatos de la carta de proyecto pueden variar de una organización a otra; sin

embargo, se identifican los siguientes elementos básicos que la deben constituir (Pyzdek, 2010):

- A. Título del Proyecto. Es necesario definir correctamente el título para permitir a otros entender el problema central que se va abordar en el mismo.
- B. Black Belt o Green Belt. Es la persona que lidera el proyecto, es importante identificarla para que en el caso de que cualquier miembro de la organización requiera información acerca del proyecto sepa con quien acudir.
- C. Mentor o Master Black Belt. Es importante identificar al líder en el ramo de six sigma dentro de la organización a quien se debe acudir para el caso de que surjan dudas o problemas en relación con la aplicación de la metodología DMAIC o de las herramientas estadísticas inherentes a six sigma.
- D. Fecha de Inicio de proyecto. Este campo tiene como propósito la documentación de la fecha en la cual se inicia el proyecto de manera formal.
- E. Objetivo del proyecto. Se detalla el objetivo anticipado que se espera del proyecto, se puede expresar en términos de reducción de ciclo, defectos o variación.
- F. Declaración del Problema. En esta parte debemos detallar cómo es que el defecto que encontramos está afectando a nuestro cliente ya sea interno o externo.
- G. Miembros del Equipo. Es un listado de todos los integrantes del equipo del proyecto que incluye al líder de proyecto, el master Black Belt y todos los expertos de departamentos involucrados en el proceso.
- H. Cronograma de proyecto. Es la definición del tiempo en los cuales se debe cubrir las 5 fases del proyecto DMAIC. Para realizar el cronograma es de suma

importancia la participación del master Black Belt ya que este tiene la experiencia en la realización de proyectos y tiene el conocimiento del tiempo que se requiere para cubrir cada fase (RW, 2001).

En la Figura 4 se muestra la carta de proyecto con los elementos anteriormente citados de acuerdo con la codificación alfabética.

Six Sigma Project Charter

A ← **Project Title** Reduce Thickness variation in K2XX Vinyl Sheet **Black Belt** Andrés Vázquez **Plant** Puebla

CIPT Number 16993 **Star Date:** Feb. 2015 **Project Champion** Rogelio Fortunio **Process Owner** Production Manager

F ← **Problem Statement** For the K2XX Dash Insulator production (Line 485) the forming process reports the thickness out of specification for Vinyl sheets as its second largest scrap contributor (3.3%) in 2014.

CT(s)

CTD: Delivery on time
 CTQ: Compliance with specifications
 CTC: Competitive cost avoiding spends in electric energy and overhead to reprocess rejected vinyl sheets
 CTS: Zero accidents
 CTE: Avoid environmental impact due to reprocess rejected vinyl sheets (electric energy consumption)

E ← **Project Objective** Reduction of 50% DPMO from 61,728 to 30,824

Defect Definition Any vinyl sheet with thickness out of specification (3.3 +/- 0.1mm), one opportunity per event.

H ←

	DPMO/PPM	g	Project Timeline			Team Members	
			Phase	Expected	Actual		
Current Situation	61,728	3.0	Define	31.01.15	31.01.15	1 Alvaro Rosas	5 Isaura Ramirez
Goal	30,824	3.4	Measure	28.04.15	7.06.15	2 Beatriz Ramirez	6 Ricardo Villegas
Stretch Goal	15,412	3.7	Analyse	27.10.15	14.11.15	3 León Reyes	7 Osbaldo Sánchez
			Improve	29.02.16	2.03.16	4 Ismael Teran	8 Pedro Paez
			Control	22.04.16	22.04.16		

G →

Hard Savings	Annual (12 mo.)	Units	\$/Unit	Total	First Calendar Year	Units	\$/Unit	Total
	Direct Labor (hrs)				\$0	Direct Labor (hrs)		
Indirect Labor (hrs)				\$0	Indirect Labor (hrs)	0	\$0.00	\$0
Materials/Scrap				\$0	Materials/Scrap	0	\$0.00	\$0
Pkg/Freight				\$0	Pkg/Freight			\$0.00 \$0
Inv. Reduction				\$0	Inv. Reduction			\$0.00 \$0
Burden				\$0	Burden			\$0.00 \$0
Total				\$0	Total			\$0

One Time Savings	Description	\$	Indirect & Soft Benefits
One Time Costs	RPM Indicators	\$1,000	Due to reduce Scrap in K2XX line an avoid reprocess vinyl 34,679 UDS/yearly

Figura 4. Carta de proyecto de acuerdo con el formato utilizado en la empresa de autopartes.

2.4 FASE DE MEDICION.

Se puede definir la palabra medición como la asignación de números a los fenómenos observados de acuerdo con ciertas reglas. La medición es un requisito de cualquier ciencia (Pyzdek, 2010).

La fase de medición es esencial en six sigma ya que es aquí donde conectamos la voz del cliente con el proceso (Kubiak T. , 2010). Esta fase conlleva la selección de las características críticas del producto es decir las variables dependientes que están condicionadas o son resultado de los parámetros propios del proceso. El objetivo primordial en esta fase es la evaluación de un desempeño base del proceso con respecto a la característica del producto que fue establecida en la fase de definición (Hoerl, 2004); para lograr este objetivo es necesario cubrir los siguientes tres pasos:

- ✓ Definir las variables críticas relacionadas con el producto que buscamos mejorar.
- ✓ Evaluar la validación del sistema de medición que hemos establecido con el objetivo de contar con un medio confiable para medir el proceso.
- ✓ Establecer la capacidad actual del proceso a fin de cuantificar las mejoras esperadas.

Se puede afirmar que la calidad se inicia con la medición ya que una vez que la calidad se cuantifica se puede iniciar un debate significativo para realizar las mejoras. Después de desarrollar los tres pasos descritos anteriormente se está en la posibilidad de tener un entendimiento claro del desempeño actual del proceso y sólo conociendo en dónde estamos ubicados actualmente podremos definir dónde queremos ubicar nuestro proceso en un futuro (Tsung, 2006).

2.4.1 Identificando las variables críticas.

Los proyectos alineados a las variables críticas tienen el impacto más grande para el cliente y el negocio directamente (Muralidharan, 2012). A continuación, se describen las variables críticas del proceso:

- Crítico de Costo: Describe el impacto del costo para el cliente.
- Crítico de Seguridad: Se enuncia a partir de las necesidades de seguridad del producto o del proceso.
- Crítico de Entrega: Representa las necesidades del cliente con respecto de la entrega de su producto. Una entrega a tiempo siempre es apreciada por el cliente.
- Crítico de Calidad. Se refiere a los requerimientos de calidad en general, estos pueden ser mediciones físicas como el tiempo de ciclo, peso, intensidad, etc.

Con respecto al proyecto de reducción de variación de espesor en la producción de la lámina de vinil en la empresa de autopartes las variables críticas se definieron de la siguiente forma:

- Crítico de Costo: Evitar el costo de material rechazado.
- Crítico de Seguridad. Cumplir el objetivo de cero accidentes.
- Crítico de Entrega. Cumplir al 100% con las entregas a tiempo al cliente.
- Crítico de Calidad. Cumplir con el objetivo de 1.5 % máximo de rechazo en la línea de producción.

2.4.2 Colección de datos.

Después de definir a las variables críticas se debe continuar con la de determinación del desempeño del proceso, y para ello se requieren datos. Los datos son observaciones hechas en un determinado ambiente, estas observaciones responden preguntas tales como: ¿Cuánto?, ¿Qué tan largo?, ¿Con qué frecuencia?, ¿Qué tan rápido?, entre otras. Los datos tienen la característica de que pueden ser representados por números; al representar las mediciones mediante números evitamos la ambigüedad que se puede presentar con las palabras (Kachingan, 1986), para la colección de datos se requiere tomar en cuenta varias consideraciones tales como: la capacitación de las personas que tomarán los datos, así como su supervisión y la planeación

de las actividades a realizar. Una colección apropiada de datos ayuda a conocer y cuantificar el objeto de estudio, a monitorear el proceso y a decidir si se aceptan o se rechazan los resultados de este.

2.4.2.1 Tipo de Datos.

Para poder determinar un plan de colección de datos es necesario identificar la clase de datos que se van a coleccionar y analizar. Los datos generalmente se clasifican en dos tipos: Discretos y Continuos. Los datos discretos son aquellos que surgen de un conteo o que sólo pueden tener ciertos valores y tienen la característica de que toman un número finito de valores, por ejemplo, el número de piezas defectuosas, el número de piezas fuera de especificación, la cantidad de embarques que se entregan a tiempo, etc. Los datos continuos en cambio pueden tomar cualquier valor (un número infinito de valores) dentro de un cierto intervalo, por ejemplo, tiempo de ciclo, presión, el largo de una pieza, el radio de un tornillo, tiempo de espera de una llamada, etc.

La característica que se buscó controlar en el proyecto es el espesor de la lámina de vinil de aislante acústico; dicho espesor puede tomar un valor infinito dentro del rango o especificación definido, por lo cual se identifica que la variable a controlar, en la cual se enfoca el proyecto de esta tesis, es un dato de tipo continuo. Esta definición nos ayudará a elegir las herramientas estadísticas con las cuales analizaremos los datos recabados.

2.4.2.2 Determinación del tamaño de la muestra.

Los factores que determinan el tamaño de la muestra son la distribución de la población, el nivel de confianza y el margen de error permitido. Para el caso de conocer la distribución de la población se puede realizar un estudio piloto para tener una medida como la media y la desviación estándar (S), en caso de no tener datos, se pueden adoptar los supuestos de posición conservadora, esto es, considerando un universo infinito en donde $S=0.5$ (Lopez, 2005). El nivel de confianza se refiere a la probabilidad de que la estimación efectuada se ajuste a la realidad. El error es el porcentaje de incertidumbre de que la muestra elegida no sea representativa. A medida que se incrementa el tamaño de la muestra, el error muestral tiende a reducirse.

Dependiendo del tipo de muestreo que se aplique a la investigación se puede ocupar una fórmula para calcular el tamaño de la muestra. Para el caso de un muestreo aleatorio simple se ocupa la ecuación (1).

$$n = \frac{S^2}{\frac{\epsilon^2}{Z^2} + \frac{S^2}{N}} \quad (1)$$

En donde

N = tamaño de la población.

n = tamaño necesario de la muestra.

Z = margen de confiabilidad o número de unidades de desviación estándar en la distribución normal que producirá un nivel deseado de confianza.

S = desviación estándar de la población conocida o estimada a partir de anteriores estudios o de una prueba piloto.

ϵ = error o diferencia máxima entre la media muestral y la media de la población que se está dispuesto a aceptar con un nivel de confianza que se ha definido.

2.4.3 Análisis del Sistema de Medición.

Una vez que se tienen definidos los roles de cada miembro del equipo six sigma y que se ha identificado el tipo de variable a ser evaluada, el siguiente paso es comprobar que las mediciones que tomaremos son válidas y confiables; para realizar tal comprobación requerimos un Análisis del Sistema de Medición o *Measurement System Analysis (o MSA por sus iniciales en inglés)*. Si se encuentra que hay un error muy grande en la medición y este contribuye en gran medida a la variación total, el método de medición debe ser analizado antes de proceder con una estrategia de mejora de la calidad (Gryna, 2007).

2.4.3.1 Características de un sistema de Medición.

Un sistema de medición consta de los siguientes componentes:

- Instrumentos de medición.
- Evaluadores (también conocidos como operadores).
- Método o procedimiento para realizar la medición.

Para mejorar un sistema de medición es necesario evaluar qué tan bien trabaja éste contestando la siguiente pregunta: ¿Qué tanto de la variación vista en nuestros datos se debe al sistema de medición? A continuación, se describen las características que se desean obtener de un sistema de medición.

- a) Exactitud: Analiza si valores de las mediciones tienen una ligera variación del valor actual. La exactitud usualmente es evaluada comparando un promedio de mediciones repetidas contra un estándar conocido.
- b) Repetibilidad: Se basa en el hecho de que una persona que tome una medición con un instrumento obtenga siempre el mismo resultado.
- c) Reproducibilidad: Una persona (que ocupe el mismo instrumento o método) obtiene el mismo resultado que una segunda persona que realiza la medición previamente.
- d) Estabilidad: Las mediciones tomadas por una misma persona varían ligeramente con respecto del tiempo.
- e) Linealidad: La exactitud a lo largo del rango de operación del instrumento de medición.

Así mismo para poder hacer el análisis de la posible variación que tenemos en nuestro sistema de medición debemos reconocer que los componentes de dicho error se dividen en repetibilidad y reproducibilidad (conocido en el ambiente six sigma como R&R). El Estudio R&R (o por su denominación en inglés como *Gage R&R*) es llevado a cabo para determinar la variación de la medición de datos continuos.

2.4.3.2 Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad.

En un estudio R&R se evalúa de modo experimental qué parte de la variabilidad total observada en los datos es atribuible al error de medición; además, permite cuantificar si este error es mucho o poco en comparación con la variabilidad del producto y con las tolerancias de la característica de calidad que se mide.

A continuación, se describen los pasos de para realizar un estudio R&R:

- Seleccionar a dos o más operadores para realizar el estudio acerca del instrumento de medición de interés.
- Seleccionar aleatoriamente un conjunto de por lo menos 10 piezas que serán medidas varias veces por el operador. Es importante que la selección se realice a partir de piezas que reflejen las diferentes mediciones.
- Decidir el número de ensayos o veces que el operador medirá las piezas. Por lo menos se deben hacer dos ensayos.
- Identificar la zona o punto en la parte en donde la medición será tomada, así como el método o técnica que debe aplicarse.
- Obtener de modo aleatorio la primera medición o ensayo del operador (A) para todas las piezas seleccionadas.
- Volver a seleccionar aleatoriamente las piezas y obtener la primera medición del operador B.
- Continuar hasta que todos los operadores hayan realizado la primera medición.
- Repetir los tres pasos anteriores hasta completar el número de ensayos elegidos. En cada medición realizada el operador no debe conocer cual pieza está midiendo ni cuáles fueron sus mediciones anteriores sobre ella.
- Hacer el análisis estadístico.

2.4.3.3 Evaluación del estudio R&R.

Ya que realizamos las mediciones del estudio R&R contamos con datos para confirmar la validez y confiabilidad de dichas mediciones. Una forma general de representar la variación de un proceso, generada por varias causas independientes, es mediante la desviación estándar, representada por σ en la ecuación (2) (Gryna, 2007) considerando hasta N causas determinadas de variación. Si se utilizan las mediciones de un instrumento para diferentes unidades de un producto, la variación total se puede atribuir al método de medición, así como al producto en sí mismo.

$$\sigma_{\text{observada}} = \sqrt{\sigma^2_{\text{causaA}} + \sigma^2_{\text{causaB}} + \dots + \sigma^2_{\text{causaN}}} \quad (2)$$

Actualmente hay software que permite analizar los resultados de un estudio R&R, uno de ellos es MINITAB® el cual se ocupa en la empresa de autopartes de manera estandarizada por directriz del corporativo, en Minitab® el resultado del estudio R&R se representa mediante un determinado porcentaje de variación. El siguiente es un criterio generalmente aceptado para decidir si el método de medición es idóneo o no (Gijo, 2013).

1. Gage R&R < 10%- El sistema de medición se considera excelente.
2. Gage R&R 10-30%- El sistema de medición es aceptable.
3. Gage R&R > 30%- El sistema de medición no es aceptable.

2.4.3.4 Método de Rangos para el estudio R&R.

Un método muy sencillo para calcular la variación de un sistema de medición es a través de un estudio de rangos, inicialmente se calcula el rango o diferencia en las mediciones para cada operador. Este rango denotado con la letra R_N en donde el subíndice N indica al operador es una información directa sobre la repetibilidad, ya que la medición se realiza sobre una misma pieza y la ejecuta el mismo operador. A continuación, se obtienen el promedio de los rangos (\bar{R}) de todos los operadores mediante la ecuación (3):

$$\bar{R} = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C}{n} \quad (3)$$

Después de obtener el valor del promedio de los rangos se utiliza la ecuación (4) para el cálculo de la variación por repetibilidad ($\sigma_{\text{repetibilidad}}$), en donde d_2 es una constante que depende del número de ensayos y su valor se obtiene de la Tabla de Factores para la construcción de las tablas de las cartas de control (Tabla 1 del Anexo).

$$\sigma_{\text{repetibilidad}} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (4)$$

Posteriormente para el cálculo de la variación por reproducibilidad se ocupan los datos obtenidos de los rangos de medición (\bar{x}) realizado por el mismo operador (n) tomando los valores mínimos y máximos de acuerdo con las siguientes definiciones (5).

$$\begin{aligned} \bar{x}_{\max} &= \max(\bar{x}_A, \bar{x}_B, \bar{x}_C) \\ \bar{x}_{\min} &= \min(\bar{x}_A, \bar{x}_B, \bar{x}_C) \\ R_{\bar{x}} &= \bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min} \end{aligned} \quad (5)$$

Finalmente, el valor de los rangos de medición realizado por el mismo operador ($R_{\bar{x}}$) se ocupa en la relación que se muestra en la ecuación (6) para calcular la reproducibilidad en la cual también se ocupa la constante d_2 indicada en la Tabla 1 del Apéndice. El valor de la variación del sistema de medición será igual a la suma de los cuadrados de la repetibilidad y la reproducibilidad, dicha relación está indicada en la ecuación (7).

$$\sigma_{\text{reproducibilidad}} = \frac{R_{\bar{x}}}{d_2} \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_{\text{gage}}^2 = \hat{\sigma}_{\text{reproducibilidad}}^2 + \hat{\sigma}_{\text{repetibilidad}}^2 \quad (7)$$

2.4.3.5 ANOVA para el estudio R&R.

La ventaja del Método de Rangos anteriormente descrito se basa en su simplicidad, sin embargo, no considera la variación en la interacción del operador y la pieza. El método más efectivo para poder identificar y cuantificar todas las fuentes de variación en un estudio R&R es

el método Análisis de Varianza (en inglés *Analysis Of Variance* y referido por sus iniciales como ANOVA). Con el método ANOVA la variación total se puede escribir como la suma de las varianzas de cada componente en el cual se debe considerar la variación de cada pieza (σ_{parte}), la variación debida al operador (σ_{oper}), la variación de la interacción pieza y operador ($\sigma_{\text{operxparte}}$) y la variación de la instrucción de medición (σ_{instr}) tal como se describe en la ecuación (8).

$$\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{parte}} + \sigma^2_{\text{oper}} + \sigma^2_{\text{operxparte}} + \sigma^2_{\text{instr}} \quad (8)$$

A fin de estimar los componentes de la variación expresada en la ecuación (8) se debe hacer uso de la técnica ANOVA aplicada a un diseño factorial con efectos aleatorios, para ello es necesario aplicar el concepto de suma de cuadrados. La suma de los cuadrados (SC) representa una medida de la variación o desviación con respecto a la media. El cálculo de la suma total de los cuadrados considera tanto la suma de los cuadrados de los factores como la aleatoriedad o el error (Spiegel, 2007). Con los datos del estudio se pueden calcular las sumas de cuadrados para cada componente de la variación con lo que la expresión matemática de la variación total se puede expresar como sumas de cuadrados de cada componente de acuerdo con la ecuación (9).

$$SC_{\text{total}} = SC_{\text{parte}} + SC_{\text{oper}} + SC_{\text{operxparte}} + SC_{\text{error}} \quad (9)$$

El desarrollo de la suma de cuadrados se basa en la notación de punto donde se representan sumas y medias a partir de datos experimentales de acuerdo con lo descrito en la literatura (Gutierrez, 2012). Hay que considerar que la suma de cuadrados del error (SC_{error}) corresponde a la repetibilidad y teniendo en cuenta que en el estudio R&R tenemos “ p ” partes, “ t ” ensayos y “ o ” operadores, los grados de libertad correspondientes a cada suma de cuadrados de la ecuación anterior se expresan de acuerdo con la ecuación (10).

$$pot - 1 = (p - 1) + (o - 1)(p - 1) + po(t - 1) \quad (10)$$

Si dividimos cada suma de cuadrados entre sus grados de libertad se obtienen los cuadrados medios (CM) cuyas expresiones para cada componente de la variación total podemos ver en la ecuación (11), el valor de cada CM nos indicará la variación por cada componente de la variación total del estudio (Pulido, 2009). Es importante identificar que la repetibilidad está

definida por la variación del instrumento y la reproducibilidad es la suma de la variación del operador y la interacción operador-pieza. Al obtener el valor de la variación total se considera el criterio de aceptación descrito en la sección de evaluación de estudio R&R para decidir si el sistema de medición es aceptable o no.

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}^2_{\text{instrumento}} &= CM_{\text{error}} \\ \hat{\sigma}^2_{\text{parte}} &= \frac{CM_{\text{parte}} - CM_{\text{operaxparte}}}{to} \\ \hat{\sigma}^2_{\text{opera}} &= \frac{CM_{\text{operador}} - CM_{\text{operaxparte}}}{tp} \\ \hat{\sigma}^2_{\text{operaxparte}} &= \frac{CM_{\text{operaxparte}} - CM_{\text{error}}}{t}\end{aligned}\quad (11)$$

Por otra parte, los cálculos anteriores se pueden realizar mediante el software Minitab® el cual despliega la tabla de resultados que se indica en la Figura 5. Se indican con elipses los datos con los cuales discerniremos la viabilidad del sistema de medición. Por ejemplo, en A se muestra el valor de P (el cuál será definido en el capítulo de la fase de Análisis) el cual al tener un valor menor a 0.05 indica que la interacción entre las partes y los operadores se considera significativa. En B se observa el dato de la variación total para el MSA el cual, al ser menor al 10%, se puede considerar excelente. En la elipse C se puede ver el valor de la repetibilidad y la reproducibilidad con lo cual podremos distinguir la aportación particular para cada contribuyente a la variación del sistema de medición, estos datos nos ayudarán a tomar una decisión en el caso de que el MSA no resulte aceptable y nos permitirán definir si es necesario mejorar el instrumento de medición (repetibilidad) o el entrenamiento de los operadores (reproducibilidad). Por último, D muestra la variación entre partes la cual es mayor que la variación del sistema de medición por lo cual se concluye que la mayor parte de la variación del proceso se debe a diferencias entre las partes.

MINITAB Gage R&R Study - ANOVA Method

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	9	52.8017	5.86686	108.248	0.000
Operator	2	1.0426	0.52128	9.618	0.001
Parts * Operator	18	0.9756	0.05420	1.540	0.144
Repeatability	30	1.0560	0.03520		
Total	59	55.8758			

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.06805	6.56
Repeatability	0.03520	3.39
Reproducibility	0.03285	3.17
Operator	0.02335	2.25
Operator*Parts	0.00950	0.92
Part-To-Part	0.96878	93.44
Total Variation	1.03683	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.26087	1.56522	25.62
Repeatability	0.18762	1.12570	18.43
Reproducibility	0.18125	1.08753	17.80
Operator	0.15282	0.91692	15.01
Operator*Parts	0.09746	0.58478	9.57
Part-To-Part	0.98426	5.90559	96.66
Total Variation	1.01825	6.10949	100.00

Figura 5. Tabla de resultados de un análisis R&R realizado en Minitab®.

De la misma forma el software Minitab® despliega una serie de gráficas que detallan los resultados del MSA; como se muestra en la Figura 6 la gráfica de barras (Components of Variation) representa la contribución de cada componente en el estudio, en la parte inferior izquierda (Xbar Chart by Operator) se muestran las gráficas de las medias (X) y (R Chart by Operator) de los rangos (R) clasificando los puntos por operador en el orden de piezas. La gráfica de medias representa la reproducibilidad. El gráfico que representa las mediciones *por parte* (Measurements by Parts) permite ver las consistencias sin considerar al operador, mientras que la gráfica *por operador* (Measurements by Operator) muestra la dispersión y localización de cada operador sin considerar las piezas. Por último, la gráfica de interacción *operador-parte*

(Operator*Parts interaction) muestra si el desempeño de los operadores depende de la pieza que se mide (Pulido, 2009).

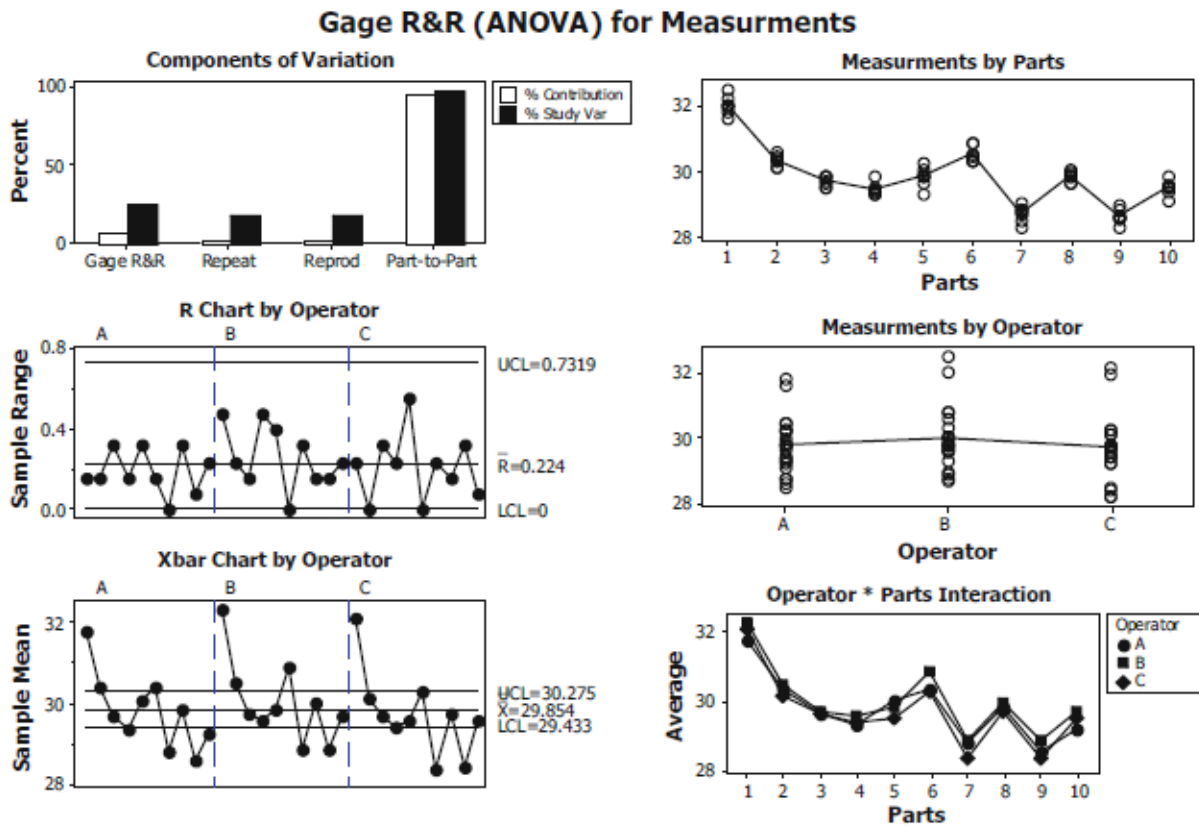


Figura 17. Gráficos de un análisis R&R realizado en Minitab®.

2.4.4 Capacidad de Proceso.

Tras el análisis R&R se puede confiar en que las mediciones tomadas son veraces y que no representan una variación adicional al proceso. En este momento estamos en la posición de investigar cual es el desempeño actual del proceso que nos interesa mejorar. El método mediante el cual determinamos la medida en la cual el rendimiento de un proceso industrial cumple con los requerimientos u objetivos que se han planeado se denomina *Análisis de Capacidad*. Con frecuencia, se espera que la variable de interés se encuentre dentro de los límites de una especificación. Es importante reconocer que la información de la capacidad de proceso y su especificación (o requerimiento) tienen orígenes totalmente distintos y son independientes entre

ellos. La especificación no determina la capacidad del proceso y viceversa, sin embargo, es necesario que ambos sean conocidos (Montgomery, 2003).

2.4.4.1 Índices de Capacidad.

La capacidad de proceso comúnmente se mide en términos de un índice de capacidad potencial del proceso (expresado como C_p) y es adimensional. El propósito de este índice es determinar si un proceso establecido cumple con los requerimientos o especificación del cliente (Brue, 2006).

A efectos de considerar que la calidad de un producto o variable de salida de proceso cumple con las expectativas del cliente éste debe ser igual a cierto valor nominal (N), o al menos tiene que estar con holgura dentro de las especificaciones inferior (EI) y superior (ES). Tomando en cuenta lo anterior C_p se define con la ecuación (12).

$$C_p = \frac{\text{Variación Tolerada}}{\text{Variación Real}} = \frac{ES - EI}{6\sigma} \quad (12)$$

Siempre que la variación tolerada sea mayor que la variación real se considerará que el proceso cumple en gran medida con las especificaciones del cliente, por esta razón es deseable que el índice C_p sea mayor a uno; en caso de que sea menor a uno, se tendrán evidencias para considerar que el proceso no cumple con las especificaciones. En la Tabla 2 se presenta la interpretación para distintos valores de C_p .

VALOR DE INDICE C_p	CATEGORIA DEL PROCESO	INTERPRETACION
$C_p \geq 2$	Clase Mundial	Calidad Six Sigma.
$C_p > 1.33$	1	Adecuado.
$1 < C_p < 1.33$	2	Parcialmente adecuado, requiere control estricto.
$0.67 < C_p < 1$	3	No adecuado para el trabajo. Es necesario un análisis del proceso.
$C_p < 0.67$	4	No adecuado para el trabajo. Requiere modificaciones muy serias.

Tabla 2. Tabla con valores de C_p y su interpretación, datos tomados de (Pulido, 2009).

2.4.4.2 Índices C_{pi} , C_{ps} y C_{pk} .

Como se puede observar C_p no considera el centrado del proceso ya que en la fórmula de su cálculo no se incluye la media (μ) del mismo. Para poder evaluar el centrado del proceso se debe evaluar el C_p con respecto de la especificación superior e inferior, a través del índice de *capacidad superior* (C_{ps}) y el *índice de capacidad inferior* (C_{pi}). Estos índices calculan la distancia de la media del proceso a una de las especificaciones; tal distancia representa la variación tolerada para el proceso de un solo lado de la media, por lo cual se considera solamente la mitad de la variación real del proceso (3σ). Se considera un proceso adecuado para un valor de C_{ps} y C_{pi} mayor a 1.25, las expresiones matemáticas de ambos índices se indican en la ecuación (13).

$$C_{ps} = \frac{ES - \mu}{3\sigma} ; C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3\sigma} \quad (13)$$

Por otra parte, el índice C_{pk} se conoce como *índice real del proceso*, en el cual se considera el centrado del proceso y está determinado por la ecuación (14). Como se aprecia, este índice toma el valor más pequeño entre el C_{ps} y C_{pi} . El valor de C_{pk} siempre va a ser igual o menor a C_p , pero la cercanía entre ambos valores indicará que la media del proceso se encuentra cerca del punto medio de la especificación. Por el contrario, valores alejados de C_{pk} y C_p indicarán que la media del proceso está alejada del centro de la especificación y en medida de que se corrija el proceso de descentrado C_{pk} va a tender al mismo valor de C_p . Se pueden obtener valores negativos de C_{pk} lo cual indica que la media del proceso está fuera de la especificación.

$$C_{pk} = \min \left[\frac{\mu - EI}{3\sigma}, \frac{ES - \mu}{3\sigma} \right] \quad (14)$$

2.4.4.3 Índices P_p , P_{pk} .

La capacidad de proceso puede tener una visión a corto o largo plazo. Dependiendo si nuestro interés es evaluar un proceso en el cual se consideren las influencias externas (dígase cambios de temperatura, turnos, lotes de materia prima, operadores, entre otros) que dependen del tiempo estaríamos evaluando una *capacidad de proceso a largo plazo*. En el caso contrario, si no estamos interesados en evaluar tales influencias externas estaríamos calculando una *capacidad de proceso a corto plazo*. Básicamente, la diferencia, en la evaluación de las

capacidades de proceso antes mencionadas, estriba en el cálculo de la desviación estándar (σ); para el corto plazo se utiliza una relación en la que se consideran solamente el rango (\bar{R}) de los subgrupos de los datos obtenidos en un periodo corto de tiempo tal como se muestra en la ecuación (15) y esta desviación estándar se aplica en el C_p .

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{D_2} \quad (15)$$

Por otro lado, para el caso de la capacidad de proceso a largo plazo, la desviación estándar se calcula a partir de todos los datos recabados ya que se considera que estos fueron obtenidos durante un periodo de tiempo suficientemente grande lo cual da una perspectiva en la cual se consideran la variación y los desplazamientos del proceso a lo largo del tiempo, de tal forma que se utiliza la expresión referida en la ecuación (16).

$$\hat{\sigma} = S \quad (16)$$

De acuerdo con las consideraciones anteriores el índice de capacidad a largo plazo o P_p se define con la ecuación (17)

$$P_p = \frac{ES - EI}{6\sigma_L} \quad (17)$$

En donde σ_L representa la desviación estándar a largo plazo. Así mismo, para considerar el centrado del proceso se define el índice P_{pk} que es similar al C_{pk} y cuya única diferencia recae en el cálculo de σ , como lo muestra la ecuación (18). La interpretación de los valores de P_p y P_{pk} siguen las mismas reglas definidas en la Tabla 2 para los índices de C_p .

$$P_{pk} = \min \left[\frac{\mu - EI}{3\sigma_L}, \frac{ES - \mu}{3\sigma_L} \right] \quad (18)$$

2.4.4.4 Índice Z.

Otra forma de medir la capacidad de proceso es a través del índice Z. Este índice consiste en calcular la distancia entre la especificación del proceso y la media μ en unidades de desviación

estándar σ . Para un proceso con doble especificación se tiene un índice Z superior (Z_s) y un índice Z inferior (Z_i) definidos en la ecuación (19). La capacidad de proceso medida en términos de Z es igual al valor mínimo entre Z_s y Z_i .

$$Z_i = \frac{Ei - \mu}{\sigma} \quad , \quad Z_s = \frac{\mu - ES}{\sigma} \quad (19)$$

En caso de que la desviación estándar utilizada en el cálculo del índice Z sea de corto plazo se estará obteniendo Z para el corto plazo (Z_c); por el contrario, si la desviación estándar utilizada es de largo plazo se obtendrá Z a largo plazo (Z_L). La diferencia entre Z_c y Z_L se denomina desplazamiento o movimiento del proceso y se denota como Z_M ; si no se conoce Z_M se asume un valor de 1.5 (Pulido, 2009).

2.4.5.5 Defectos por millón de oportunidades de error (DPMO).

En el caso de datos discretos no se puede ocupar el índice Z para evaluar la capacidad de proceso. Para ese efecto se utilizan las siguientes definiciones:

- Defecto por unidad (DPU). Es una medida del nivel de no calidad que se obtiene dividiendo el número de unidades defectuosas entre las unidades inspeccionadas.
- Defecto por oportunidad (DPO). Medición en la que se toma en cuenta el número de oportunidades de error por unidad, es decir, toma en cuenta la complejidad del producto; se obtiene dividiendo las unidades defectuosas entre el producto de la multiplicación de las unidades inspeccionadas con el número de oportunidades de error por oportunidad.
- Defecto por millón de oportunidades (DPMO). Con esta medición se cuantifican los defectos en un millón de oportunidades de error y se obtiene al multiplicar el valor de DPO por un millón (Pulido, 2009).

Para resumir, en la Tabla 3 se ilustran los índices de capacidad a corto y largo plazo y sus respectivos valores de partes por millón fuera de especificación. Para obtener estos cálculos se ocupa Minitab® y a partir de los valores obtenidos podremos determinar la capacidad actual del proceso y definir el objetivo del proyecto.

CALIDAD DE CORTO PLAZO			CALIDAD DE CORTO PLAZO		
VALOR DE ÍNDICE Cp.	CALIDAD EN SIGMAS.	PARTES POR MILLÓN FUERA DE LA ESPECIFICACIÓN.	VALOR DE ÍNDICE Z _L .	CALIDAD EN SIGMAS.	PARTES POR MILLÓN FUERA DE LA ESPECIFICACIÓN.
0.33	1	317,300	-0.05	1	697,700
0.67	2	45,500	0.5	2	308,700
1.00	3	2,700	1.5	3	66,807
1.33	4	63	2.5	4	6,210
1.67	5	0.57	3.5	5	233
2.00	6	0.002	4.5	6	3.4

Tabla 3. Tabla comparativa de índice de capacidad Cp y partes por millón fuera de especificación. Tomado de (Pulido, 2009).

2.5 FASE DE ANALISIS.

El objetivo de la fase de análisis es identificar las causas raíz que son responsables de la variación del parámetro que nos interesa controlar y mejorar (Gijo EV, 2010). Los objetivos y entregables de esta fase son los siguientes:

- Validar la diferencia de los requerimientos del cliente contra los métricos actuales del proceso con sus causas vitales.
- Determinar las causas raíz e identificar las que contribuyen en mayor grado en la diferencia de los requerimientos del cliente mediante un análisis de causa y efecto.
- Evaluar a los mayores contribuyentes (denominadas variables significativas) a través del análisis estadístico.

2.5.1 Identificación de fuentes de variación.

El primer paso de la fase de análisis consiste en realizar por parte de los miembros del equipo un estudio detallado del proceso con todo el personal involucrado o interesado en el mismo, incluyendo al líder del proyecto y al *Master Black Belt*. Posteriormente se deben realizar

sesiones utilizando técnicas de resolución de problemas tales como la lluvia de ideas o el diagrama de Ishikawa para identificar las causas de la variación en el proceso; el resultado de tales sesiones dependerá del nivel de experiencia y de la creatividad de los participantes (Ishikawa K, 1985).

2.5.1.2 Mapeo del proceso.

Para todo proyecto six sigma, el entendimiento del proceso es esencial. El diagrama de flujo se utiliza en la fase de análisis para identificar las mejoras potenciales haciendo una comparación con otros procesos. Asimismo, nos ayudan a descubrir la complejidad del proceso en la forma de un excesivo número de puntos de decisión que contribuyen a retrasos e incluso defectos.

De la misma forma, el diagrama de flujo representa una imagen de los pasos que son necesarios para entender el proceso y su valor reside en identificar las actividades que conforman el proceso, así como identificar el flujo de materiales e información relacionados al mismo (Muralidharan, 2012). Cada paso del proceso se representa mediante un símbolo, existe un estándar para los símbolos establecido por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI por sus siglas en inglés). Los símbolos básicos son: rectángulos para representar las actividades, rombos para el proceso de toma de decisiones y círculos para procesos subsiguientes. En la Tabla 3 del Anexo se muestra un diagrama de flujo.

El principal valor de un diagrama de flujo reside en la identificación y mapeo de todas las actividades del proceso de producción, de modo que los flujos de materiales e información se pueden visualizar y conocer por todos los miembros del equipo del proyecto six sigma. La Figura 19 representa un proceso en el cual el flujo de información se establece a través del proveedor hacia el cliente, de tal forma que se puede concluir que la información fluye de forma escalonada del Proveedor-Entrada-Proceso-Salida-Cliente (o en inglés **Supplier-Input-Process-Output-Customer**, SIPOC).

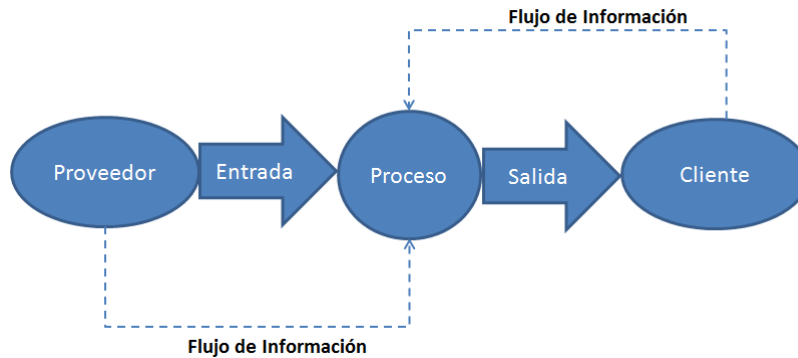


Figura 19. Flujo de información a través del proceso.

El flujo de información a través de la forma escalonada SIPOC permite abordar problemas de tiempo ciclo e identificar oportunidades de reducción de costos. Otra variante del diagrama de flujo es el mapeo a un nivel superior en el cual sólo se describen las actividades a mejorar en el proceso y para cada una de ellas se listan en el lado izquierdo los parámetros de entrada clave (x) del proceso mientras que en lado izquierdo se listan el resultado o las salidas (y) del mismo.

2.5.1.3 Lluvia de Ideas.

Una vez que el proceso es plasmado en un diagrama de flujo y conocido por los miembros del equipo del proyecto se pueden generar las ideas para identificar las causas potenciales de variación. La lluvia de ideas es una técnica simple pero efectiva para generar un conjunto de premisas a partir de un grupo de personas que disponen de un lapso corto de tiempo para resolver un problema determinado (Osborn, 1963). Adicionalmente la lluvia de ideas permite identificar la causa raíz de un problema tomando como base el esfuerzo y la experiencia de los miembros asociados a la resolución de problemas.

A continuación, se presentan los pasos para realizar una sesión de lluvias de ideas:

- Elegir el problema a resolver.
- Cada miembro, en forma alternada, expresa su idea con la intención de hallar una solución.

- El participante expone una idea por turno sin importar que tenga más ideas en mente permitiendo escuchar las propuestas de los demás miembros.
- Se continúa con la declaración de ideas de forma alternada hasta que ya no haya más propuestas.
- Se registran las ideas generadas.

Después de realizar la sesión de lluvia de ideas el líder del proyecto documenta las ideas producidas y evalúa cuales se pondrán en práctica así también debe mantener informados a los participantes de la sesión acerca de las acciones iniciadas.

2.5.1.4 Diagrama de Ishikawa.

El diagrama de causa-efecto o Ishikawa es un método gráfico que relaciona un problema o efecto con los factores o causas que posiblemente lo generan (Pulido, 2009). El análisis de este diagrama se basa en la evaluación de las causas potenciales de fallas en seis ramas principales:

- Método de trabajo. Se refiere a la estandarización, definición de operaciones y el proceso alternativo cuando no se puede llevar el método estándar.
- Mano de Obra. Hace referencia a la habilidad, conocimiento y entrenamiento del personal operativo.
- Materiales. Considera la variabilidad que puede tener el material por cambios en el proveedor y tipo de material (por ejemplo, presentación).
- Maquinaria. Implica todos los aspectos operativos de la máquina tales como la capacidad, el mantenimiento, los ajustes y las condiciones de operación.
- Medición. Evalúa aspectos tales como la repetibilidad, reproducibilidad, la disponibilidad o el sesgo al momento de tomar los valores de interés del producto.
- Medio Ambiente. Hace alusión a cualquier impacto en el proceso por cuestiones ambientales.

Los miembros del equipo del proyecto se reúnen para proponer las causas potenciales del problema de forma sistemática analizando cada una de las ramas (Medición, Material, Mano de Obra, Medio Ambiente, Método y Maquinaria) del diagrama de Ishikawa, el resultado del análisis

es un listado de posibles causas que generan el problema que se aborda en el proyecto. En la Figura 20 se presenta el diagrama de Ishikawa en el formato de Minitab.

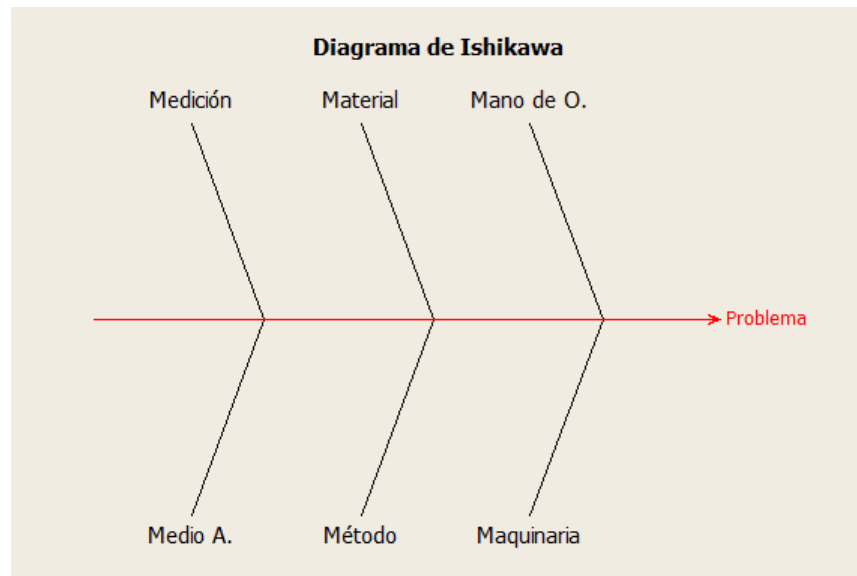


Figura 20. Diagrama de Ishikawa en el formato de Minitab®.

2.5.1.5 Análisis de Modo y Efecto de la Falla (AMEF).

Otra forma de identificar las variables significativas que afectan al proceso es a partir de la metodología de análisis de modo y efecto de la falla (AMEF) el cual se basa en identificar y priorizar las fallas potenciales que se pueden suscitar durante el proceso productivo (AIAG, 2008). Existen dos tipos de AMEF, la de diseño y la de proceso; debido a que la metodología six sigma se aplica a procesos estables y no a productos en fase de diseño ocuparemos el AMEF de proceso.

Para la elaboración del AMEF se debe organizar un grupo con todos los departamentos relacionados con el proceso, posteriormente se debe delimitar el producto o proceso a analizar, a continuación se identifica la falla que se puede presentar en el mismo y de acuerdo a su efecto en la funcionalidad del producto se le asigna un valor de *severidad*, el equipo debe evaluar las causas que generan tal falla y estimar su frecuencia de *ocurrencia*; asimismo, se deben listar los controles que se establecen para detectar la ocurrencia de la falla y valorar la probabilidad de que éstos hagan la *detección* de la misma. Como podemos ver tenemos tres parámetros clave en el desarrollo de la AMEF (detección, severidad y ocurrencia) a éstos se les asignan valores de acuerdo con el criterio que se presenta en la Tabla 4.

Clasificación		Severidad	Ocurrencia	Detección
ALTO	10	Altamente Severo	Muy alta e inevitable	No se puede detectar o la detección es improbable
		Pérdida de la funcionalidad primaria	Fallas altamente repetidas	Remota probabilidad de detección
		Pérdida de la funcionalidad secundaria	Fallas moderadas	Baja probabilidad de detección
		Defecto menor	Fallas ocasionales	Probabilidad moderada de detección
		BAJO	1	Sin efecto

Tabla 4. Criterios de calificación de Severidad, Ocurrencia y Detección, datos tomados de (Muralidharan, 2012).

Con los valores que se establecen para estos tres parámetros se obtiene su producto y el valor obtenido se define como el Número Prioritario de Riesgo (NPR) de la falla que se está evaluando. A mayores valores de NPR se deben establecer acciones para disminuir la severidad y ocurrencia o en su caso mejorar la detección (Allen, 2006). El proceso detallado anteriormente se debe documentar en un formato de AMEF como el mostrado en la Figura 21. Para efectos de elegir las variables significativas que afectaban a la característica del proceso que se deseaba controlar, el análisis se debe enfocar a las fallas que afectarían la estación del proceso en la cual se desarrolló el proyecto six sigma de acuerdo al análisis del diagrama de flujo realizado previamente.

ANALISIS DEL MODO Y EFECTO DE FALLAS																		
No. De Parte:				Nivel de Ingeniería:				AMEF No:										
Descripción:				Resp. del Proceso:				No. Rev.:										
Modelo:				Elaboró:				Fecha orig.:										
Cliente:								Fecha rev.:										
No. Proceso	Requisito	Modo de Falla Potencial	Efecto Potencial de la Falla	Sev	Causa/Mec. Potencial de la Falla	Occ	Controles Preventivos del Proceso	Controles Correctivos del Proceso	Det	N.P.R.	Recomendaciones	Responsable	Fecha	Resultados de las Acciones				
														Acciones Tomadas	Sev	Occ	Det	N.P.R.
400 MOLDES DE ESPUMADO	ESPUMA DENTRO DE ESPECIFICACION	DENSIDAD FUERA DE LIMITE INFERIOR	RECHAZO DE PIEZA ESPUMADA	7	1.- FALTANTE DE CO2 EN NUCLEADOR. 2.- PARAMETROS DE EQUIPO NUCLEADOR FUERA DE ESPECIFICACION.	2	ALARMA VISUAL Y AUDITIVA QUE INDICA EL FALTANTE DE CO2. HOJA DE PARAMETROS DE PROCESO NUCLEACION. CONTROLES VISUALES DE PRESION. TANQUE DE DIA CON NIVEL DE POLIOL YA NUCLEADO.	HOJA DE ESPECIFICACION DE PROCESO. MONITOREO DE PARAMETROS DE PROCESO DOCUMENTOS COLOCADOS EN EL AREA PARAMETROS DE PROCESO EN TANQUE DE CO2	7	98	1.- LIBERACION DE PROCESO. 2.- IMPLEMENTACION DE FORMATO DE MONITOREO DE PROCESO. 3.- MONITOREO DE PROCESO. 4.- CAPACITACION A PERSONAL OPERATIVO PARA EL USO DE EQUIPO.	1.- CALIDAD. 2.- MYP 3.- PRODUCCION. 4.- MYP	1- 23/FEBRERO/2014 2- 21/FEBRERO/2014 3- 23/FEBRERO/2014 4- 21/FEBRERO/2014	CONFIRMAR QUE ESTE EQUIPO ESTA CONSIDERADO DENTRO DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO. PERSONAL OPERATIVO SE INCLUYE EN LAS HIG Y SE CAPACITA POR PARTE DEL PROVEEDOR.	7	2	5	70

Figura 21. Ejemplo de formato básico de AMEF donde se indica la Severidad (Sev), Ocurrencia (Occ) y Detección (Det).

2.5.1.6 Matriz de Causa y Efecto.

Como se ha señalado el método de lluvia de ideas, el diagrama de causa-efecto (Ishikawa) y el desarrollo del AMEF permiten la identificación de las variables relacionadas con un problema en el proceso, para relacionar esas variables con las características del producto se usa una poderosa herramienta de six sigma llamada matriz de causa y efecto. Las salidas clave del proceso (que pueden ser los parámetros del mismo proceso, como por ejemplo la temperatura o la presión o alguna característica del producto) son jerarquizadas dándole calificaciones que van del uno al diez de acuerdo con su grado de importancia con la funcionalidad que debe cumplir el producto (Henderson KM, 2000). En la matriz esas salidas clave del producto se apuntan de forma horizontal. Asimismo, las causas potenciales se enlistan en forma vertical y se relacionan cada una calificándola en un rango del uno al diez. Debido a la correlación que se considera tienen con las salidas clave, se aprecia en la Figura 22 un formato para la matriz de causa y efecto en donde se indican tanto las salidas clave como las causas potenciales. Se obtiene el producto del valor dado al grado de importancia de la salida clave con su respectivo valor de correlación con la causa potencial; la suma de todos esos productos para una determinada causa potencial nos da el valor total para ese parámetro. Los miembros del equipo del proyecto consensan con el *Master Black Belt* sobre la elección de las causas potenciales que obtuvieron los valores más altos y preparan un plan para la colección de los mismos y seleccionan la técnica estadística adecuada para la validar su influencia potencial sobre la salida o característica del proceso que se quiere controlar.

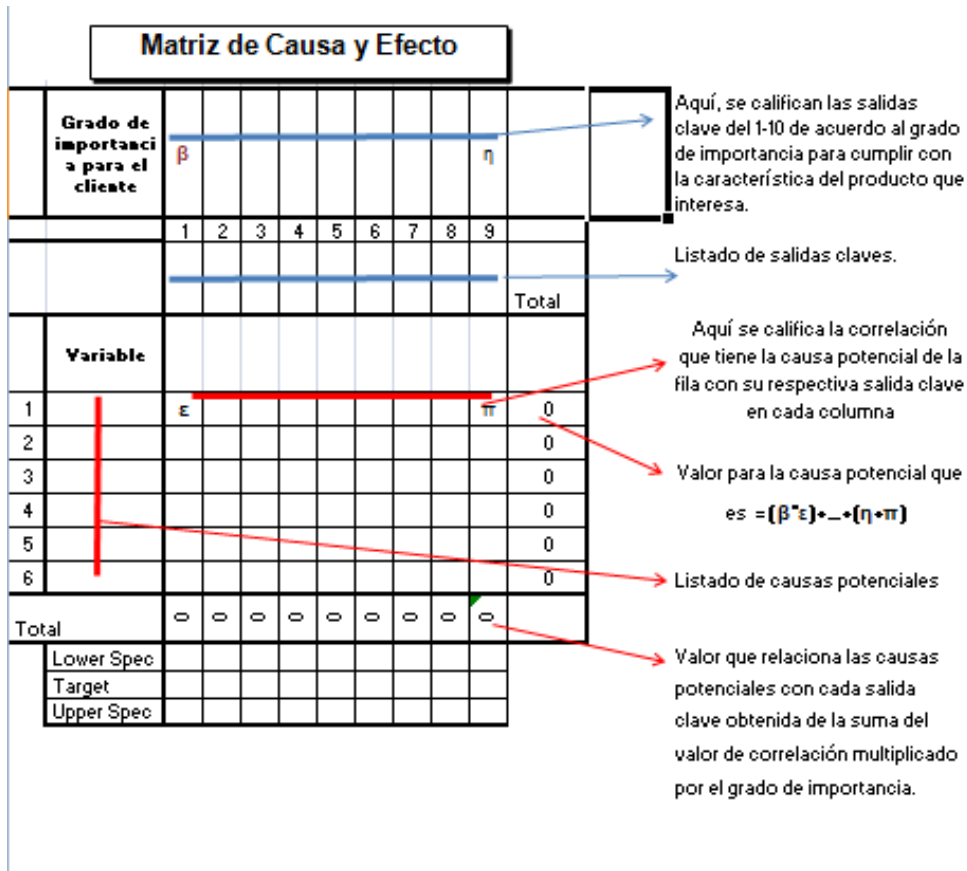


Figura 22. Formato de matriz de causa y efecto.

2.5.2 Detección de las variables significativas.

A partir del uso de las técnicas de identificación de fuentes de variación se obtiene un listado de causas potenciales que generan el efecto que se quiere reducir o eliminar con la finalidad de cumplir con los requerimientos del cliente. En la selección de dichas causas potenciales nos apoyamos en la percepción y los conocimientos de todas las personas que conocen y trabajan en el proceso productivo. El siguiente paso consistió en seleccionar la técnica estadística adecuada para discernir cuáles son las causas potenciales que afectan al proceso en mayor proporción, a dichas causas seleccionadas se les denominan variables significativas.

2.5.2.1 Inferencia Estadística y Distribuciones de Probabilidad.

El término de inferencia se define como el acto de derivar conclusiones lógicas a partir de premisas que se consideran verdaderas o el acto de realizar un razonamiento objetivo basado en datos (Pyzdek, 2010). La inferencia estadística se divide en estimación y prueba de hipótesis, tiene como objetivo hacer afirmaciones válidas acerca de una población con base en la información contenida en una muestra. La estadística inferencial se basa en funciones determinadas para muestras de datos que no contienen parámetros desconocidos; a tales funciones se les denomina estadísticos. Un aspecto clave en la interpretación y utilización de cualquier estadístico es que se trata de una variable aleatoria, ya que su valor depende de los elementos seleccionados para integrar la muestra, y por lo tanto varía de una muestra a otra. La forma de tomar en cuenta este hecho es conocer la distribución de probabilidad de cada estadístico (Gutierrez, 2012).

La distribución de probabilidad o distribución de una variable aleatoria β relaciona el conjunto de valores posibles de β con la probabilidad asociada a cada uno de estos valores y los representa por medio de una función planteada en forma de una ecuación matemática. En otras palabras, la distribución de probabilidad de β señala qué valores se espera que tome β en función de los supuestos asumidos; esto nos permite corroborar o desechar supuestos y hacer estimaciones poblacionales.

Las distribuciones de probabilidad utilizadas en la inferencia estadística son las siguientes:

Distribución Normal. Se utiliza cuando se realiza inferencia de un conjunto de datos comparándolo con una media de un valor determinado o cuando se quiere estimar la diferencia estadística de la media para dos muestras de datos siempre y cuando se conozca o defina un valor para la varianza poblacional.

Una distribución normal con una media y varianza especificada se denota como $N = (\mu, \sigma^2)$. En la Figura 23 se pueden observar las curvas normales para la misma media y diferentes valores de varianzas. La importancia de obtener una curva normal estándar recae en el hecho de que se puede calcular la probabilidad debajo de la curva y de encontrar x en un rango dado de

valores de (a, b) usando tablas estandarizadas para los valores de Z calculados. La Tabla 2 del Anexo muestra varios valores de Z para la curva normal estándar con los cuales se puede calcular la probabilidad debajo de la curva.

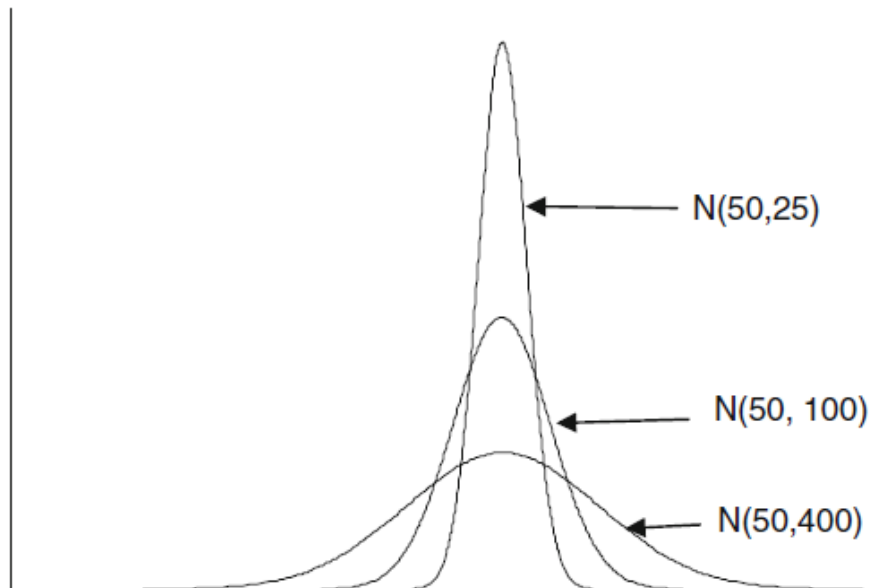


Figura 23. Distribuciones normales para distintos valores de varianza. Tomado de (Muralidharan, 2012).

Distribución T de Student. En el caso de que se quiera contrastar la media de un grupo de datos con un valor determinado o se quiere evaluar la diferencia estadística de la media para dos muestras de datos cuando la varianza sea desconocida se utiliza la distribución T de Student para realizar la inferencia estadística.

La gráfica de densidad de función de T_n (siendo n los grados de libertad) se muestra en la Figura 24.

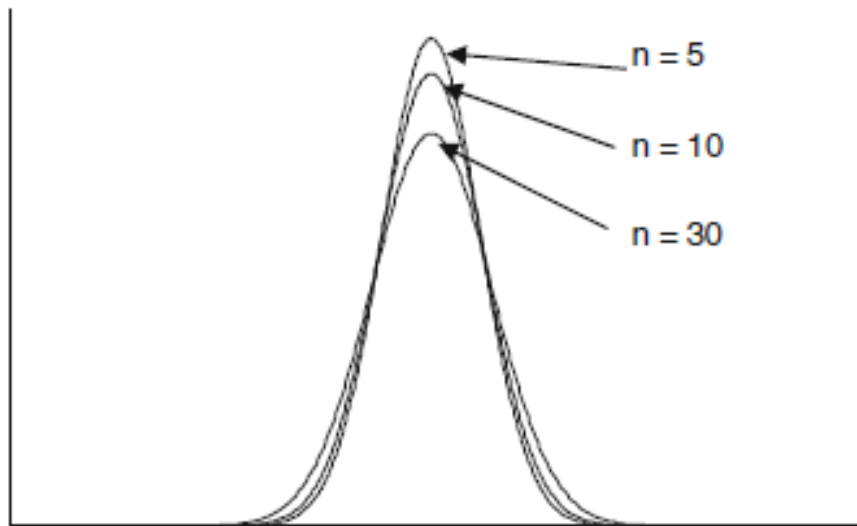


Figura 24. Densidad probabilística para la función T_n Tomado de (Muralidharan, 2012).

Distribución Chi-cuadrada. Cuando se quiere realizar inferencia de la varianza de un grupo de datos comparándola con un valor determinado se utiliza la distribución chi-cuadrada.

La notación chi-cuadrada se refiere como χ^2 y su gráfica de densidad de función se muestra en la Figura 25, en donde la distribución tiene una media n y una varianza $2n$.

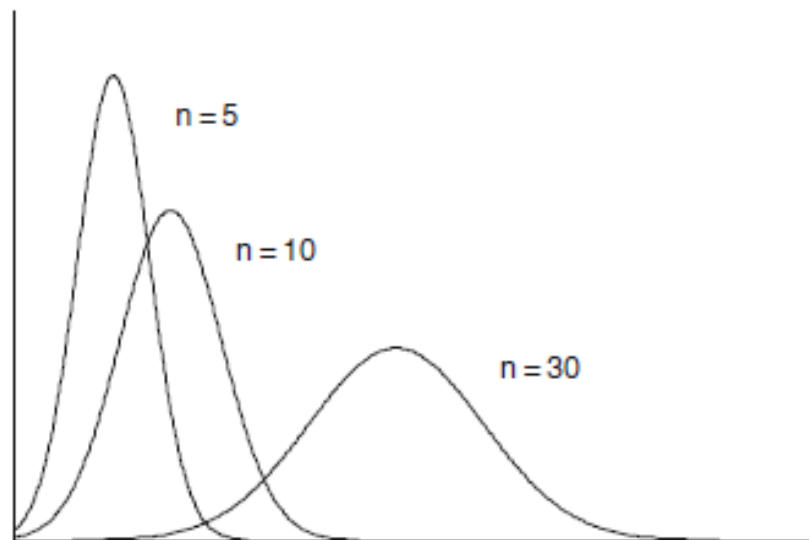


Figura 25. Distribuciones chi-cuadrada para distintos grados de libertad n . Tomado de (Muralidharan, 2012).

Distribución F. Si es de interés saber si las varianzas de dos grupos de datos son estadísticamente iguales se debe hacer inferencia sobre el cociente de ellas, tal cociente tienen una distribución de probabilidad $F_{n,m}$ siendo n y m los grados de libertad de cada grupo de datos respectivamente.

La gráfica de densidad de función $F_{n,m}$ para distintos valores de m y n se ilustra en la Figura 26. La distribución F se emplea para comparar varianzas y se considera que es la que tiene mayor relevancia en diseño de experimentos, dado que el análisis de la variabilidad que se observa en un experimento se hace comparando varianzas.

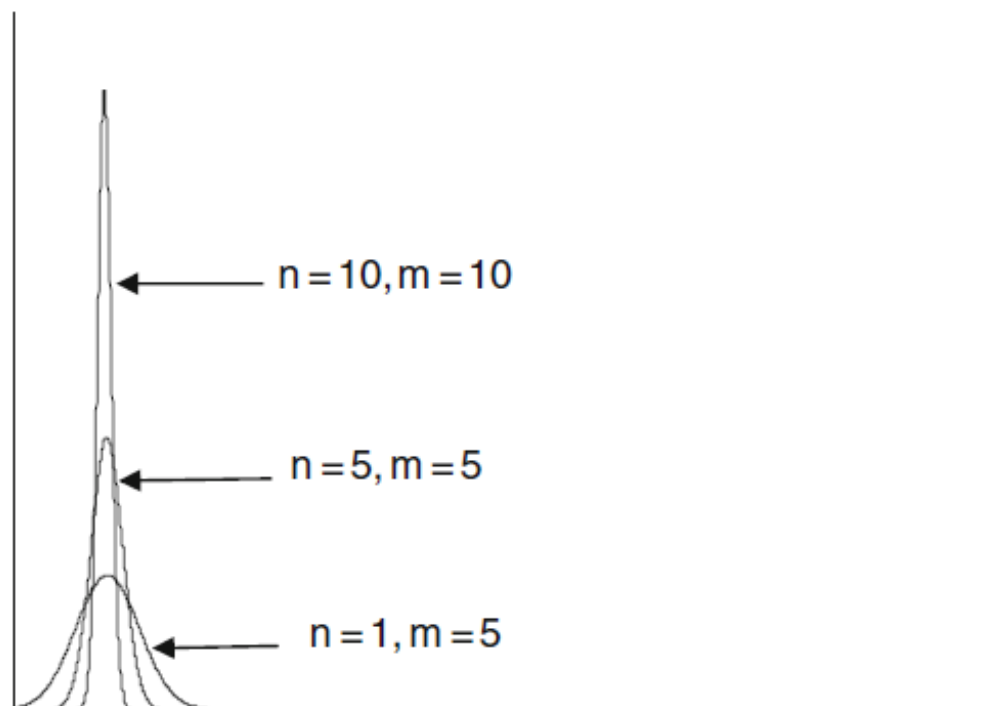


Figura 26. Densidad probabilística para la función $F_{n,m}$ para distintos valores de m y n . Tomado de (Muralidharan, 2012).

2.5.2.2 Intervalos de Confianza.

Una distribución de probabilidad se define completamente cuando se conocen sus parámetros, en caso de que estos no se conozcan es necesario hacer una estimación basándonos en datos muestrales. Las estimaciones hechas pueden ser puntuales para el caso de que se genere un valor numérico simple, por ejemplo, la media muestral \bar{X} comúnmente se estima como la media del proceso μ , esta estimación muestral puntual depende de los elementos seleccionados en la muestra a partir de la cual se calcula, arrojando cierta imprecisión.

Una forma de saber qué tan precisa es una estimación consiste en calcular el rango en el cual puede estar el parámetro con cierto nivel de seguridad o confianza. A ese nivel de confianza se le denomina “intervalo de confianza”.

Se pueden calcular intervalos de confianza para la media, la proporción y la varianza y cada uno de ellos está relacionado con un estadístico o ecuaciones cuyo desarrollo va más allá del alcance de esta tesis pero que pueden ser estimados usando software tales como Minitab® o Excel®.

2.5.3 Pruebas de Hipótesis.

2.5.3.1 Hipótesis Estadística.

Por lo general todo estudio o investigación tiene como objetivo demostrar una hipótesis. En el caso de six sigma la hipótesis a demostrar es una afirmación sobre los valores de los parámetros de una población o proceso, la cual puede probarse a partir de la información contenida en una muestra.

En estadística la hipótesis se puede expresar dividiéndola en dos declaraciones, la primera declaración se denomina hipótesis nula (H_0) y en ella suponemos que no hay cambio en los valores de los parámetros analizados, la segunda declaración se denomina hipótesis alternativa (H_A) y supone que hay una diferencia en los valores de los parámetros analizados. A fin de probar la hipótesis se debe investigar si la declaración de la hipótesis nula es verdadera o falsa,

partiendo del supuesto de que H_0 es verdadera; en caso de que los resultados de la investigación demuestran lo contrario entonces se rechaza H_0 y se acepta H_A .

De tal forma que para poder validar o rechazar la Hipótesis nula se deben tomar datos mediante un experimento diseñado con los cuales se calcula un número que se denominará *estadístico de prueba*; la magnitud de este estadístico ayudará a discernir si se acepta o rechaza la H_0 . Se debe definir un rango de valores para el estadístico de prueba con los cuales se tome la decisión de aceptar H_0 , a este rango de valores se les llama intervalo o región de aceptación, para el caso contrario la región o intervalo de rechazo es aquel rango de valores para el cual la H_0 es rechazada y se acepta la H_A .

2.5.3.2 Interpretación Gráfica del Criterio de Aceptación y Rechazo.

El estadístico de prueba se calcula a partir de una ecuación matemática que posee una distribución conocida del tipo al que hace referencia la sección 2.5.2.1; a cada parámetro estadístico (llámese media, varianza o proporción) a analizar le corresponde un determinado estadístico de prueba con su respectiva distribución de probabilidad. Si efectivamente H_0 es verdadera el valor de estadístico de prueba debería caer dentro del rango de valores más probables de su distribución asociada, el cual se conoce como región de aceptación, si cae en una de las colas de su distribución asociada, fuera del rango de los valores más probables, es evidencia en contra de que ese valor pertenece a dicha distribución y se concluye que es erróneo el supuesto del cual se construyó, es decir H_0 es falsa (Gutierrez, 2012).

A modo de entender gráficamente lo anterior, en la Figura 27 se muestra la distribución para el estadístico de prueba del cálculo de proporción, para el caso de que la H_0 declare que la proporción de rechazo de una muestra es igual al 8%. En este caso, la H_A sostendrá que la proporción sea distinta al 8%. Se muestra el intervalo de aceptación con un intervalo de confianza de $1-\alpha$ que va para el rango $(-z_{\alpha/2}, z_{\alpha/2})$. Si el valor obtenido para el estadístico de prueba a partir de nuestros datos muestrales no cae dentro del rango $(-z_{\alpha/2}, z_{\alpha/2})$ como se indica en la región sombreada del intervalo de rechazo, la H_0 se rechaza y se acepta la H_A .

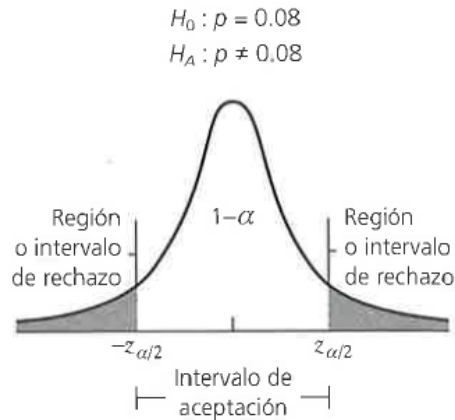


Figura 27. Criterio de rechazo de una prueba de hipótesis. Obtenido de (Gutierrez, 2012).

2.5.3.3 Criterio de Aceptación o Rechazo.

Debemos tener siempre en cuenta que para realizar la prueba de hipótesis estamos ocupando datos muestrales dado que en la mayor parte de los casos de estudios estadísticos es muy difícil o imposible obtener datos del total de una población, lo anterior nos lleva a que tengamos cierto riesgo de tomar una decisión equivocada al aceptar o rechazar la H_0 . Estos errores se clasifican de la siguiente forma:

- Error Tipo I: Rechazar H_0 cuando es verdadera.
- Error Tipo II: Aceptar H_0 cuando es falsa.

Existe una probabilidad de que cada tipo de error ocurra; para el caso del error I esta probabilidad se denota con la letra α y para el error tipo II con β . A α también se le denomina *significancia dada a la prueba* y es la región o intervalo de rechazo de la distribución del estadístico de prueba. *El valor de α debe ser definida por el investigador y, por lo general, para los estudios de six sigma esta toma un valor de 0.05.*

Al hacer la prueba para comprobar nuestra hipótesis obtendremos una significancia observada, también conocida como valor-p (o *p-value*, en inglés) que debemos contrastar con la significancia predefinida. Para este caso si el valor-p $< \alpha$ la H_0 será rechazada, ya que el valor-p señala la probabilidad de que el valor observado del estadístico de prueba ocurra si la H_0 fuera verdadera.

También se consideran otros dos criterios para la aceptación o rechazo de una prueba de hipótesis. El primero rechaza la H_0 si el valor obtenido del estadístico de prueba cae en la región de rechazo delimitada por un valor crítico definido, este método fue muy usado antes de los avances de la computación aplicada a la estadística e involucraba cálculos manuales además contaba con la desventaja de dar poca información adicional en relación a la decisión tomada. El segundo criterio se basa en rechazar la H_0 si el valor obtenido del parámetro declarado en la H_0 se encuentra fuera del intervalo de confianza declarado para el mismo parámetro. Este criterio se puede ocupar en el caso de que el software utilizado provea el intervalo de confianza para el parámetro de interés y es de ayuda en el caso de que el investigador además esté interesado en conocer el intervalo de confianza del parámetro que estudia.

En relación al proyecto de esta tesis, después de obtener la matriz causa y efecto para poder identificar a las variables significativas *se realizaron las pruebas de hipótesis considerando el uso del criterio de la comparación de la significancia observada versus la significancia dada* puesto que se contó con el software Minitab® para realizar los cálculos necesarios. El intervalo de confianza sólo generaría información respecto al rango en el que se encuentra el 90% de los datos de espesor de la lámina más no la reducción de la variación de la misma.

2.5.3.4 Prueba de Hipótesis en Minitab®.

El software Minitab® tiene una amplia gama de opciones para el análisis de la Prueba de Hipótesis, la elección de la adecuada dependerá de dos factores básicamente: el tipo de variable (continua o discreta) y el criterio de aceptación o rechazo elegido. Para el caso este proyecto planteado para reducir la variación del espesor de la lámina de vinil para aislante acústico, *la variable a analizar es continua y nuestro criterio se basa en la comparación del valor-p contra la significancia de 0.05*. Para ello se eligió el tratamiento 2-sample T para el caso de comparación de medias o el de 2-Variaciones para varianza.

En la Figura 28 se presenta la ruta en la barra de herramientas de Minitab para el análisis de pruebas de hipótesis. Como se puede observar, hay opciones para comparar proporciones,

varianza y media, también se pueden comparar un conjunto de datos contra un valor crítico definido y se tiene la opción para datos con distribución Poisson. En la Figura 29 se observa un reporte de prueba de Hipótesis de Minitab®, se aprecia en (A) la desviación estándar y la varianza de cada grupo de datos, en (B) el método seleccionado de la prueba de hipótesis y en (C) el valor-p a efectos de comprobar o descartar a la H_0 .

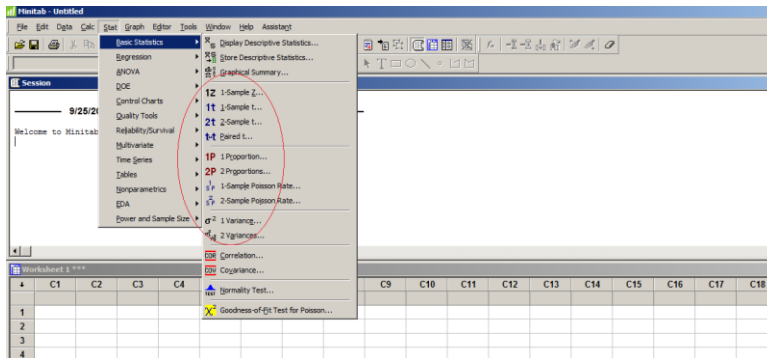


Figura 28. Ruta en la barra de herramientas de Minitab® para acceder a las opciones de pruebas de hipótesis.

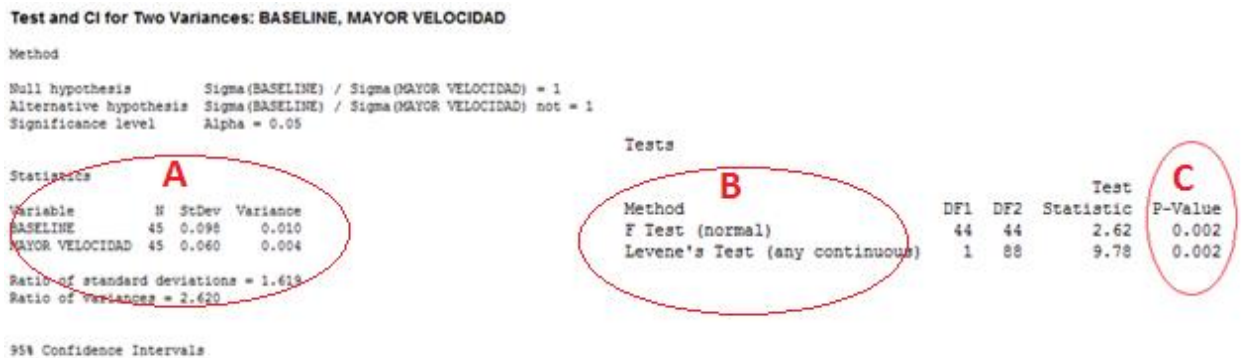


Figura 29. Reporte de pruebas de hipótesis en Minitab® donde se despliega el valor-p.

2.6 FASE DE MEJORA.

2.6.1 Diseño de Experimentos.

El Diseño de Experimentos (DOE por sus siglas en inglés) es un proceso para planear experimentos de tal forma que los datos adecuados sean coleccionados y un mínimo de ensayos se desarrollen con la finalidad de obtener la información técnica apropiada para el estudio y que posteriormente sea analizada con los métodos estadísticos adecuados (Muralidharan, 2012).

De acuerdo a (Montgomery, 2009) la aplicación potencial del diseño de experimentos en los procesos de manufactura incluye:

- Mejorar el rendimiento del proceso y su estabilidad.
- Mejorar el rendimiento y el margen de ganancia de las inversiones.
- Mejorar la capacidad de proceso.
- Reducir la variabilidad de los procesos y de esta forma la consistencia en el desempeño de un producto.
- Reducir los costos de manufactura.
- Determinar los parámetros clave de diseño que impactan el desempeño del producto.

2.6.1.1 Clasificación de los Diseños de Experimentos.

Para la introducción de conceptos en el diseño de experimentos se puede consultar bibliografía como *Design and Analysis of Experiments* 6th Ed de Douglas C. Montgomery entre otros títulos.

Se pueden definir distintos tipos de arreglos para el diseño de experimentos, de acuerdo a las combinaciones de los distintos niveles de los factores y al grado de aleatorización de los experimentos, se define la siguiente clasificación:

- *Diseño Factorial*: Este diseño considera todas las posibles combinaciones de los factores. El orden de selección de todas las combinaciones de tratamientos es de manera aleatoria.
- *Diseño Factorial Fraccionado*: En este diseño se investiga sólo una fracción de todas las posibles combinaciones de tratamientos, se usa para las condiciones en las que el costo del experimento es alto o consume mucho tiempo.
- *Diseño Aleatorio por Bloques*: Todas las combinaciones de tratamientos son evaluadas en este diseño, pero se imponen ciertas restricciones en la aleatorización, por ejemplo, un diseño en el cual los bloques contienen todos los posibles tratamientos y la aleatorización se encuentra incluida dentro de los mismos bloques.
- *Diseño de bloques incompletos*: Cuando cada tratamiento no está presente en cada bloque de un diseño aleatorio de bloques. Se usa cuando no se pueden correr todos los tratamientos de bloques por alguna restricción en el equipo del experimento.

Para el desarrollo de esta tesis se ocupará el diseño factorial considerando 2 factores cuya selección será explicada en la sección de resultados.

2.6.2 Diseño Factorial con 2 factores.

El modelo del Diseño factorial para 2 factores A y B se puede explicar de la siguiente forma: sea y_{ijk} el valor de la variable de respuesta para cuando el factor A está en el i -ésimo nivel (siendo $i=1, 2, \dots, r$) y el factor B está en j -ésimo nivel ($j=1, 2, \dots, s$) para una k -ésima réplica ($k=1, 2, \dots, t$). Si las observaciones están aleatorizadas entonces el número total de observaciones es igual al producto de rst . El modelo anterior se describe mediante la ecuación (20)

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (20)$$

Considerando a μ como la media general del efecto, α_i como el efecto del i -ésimo nivel para el factor A, β_j es el efecto del j -ésimo nivel para el factor B y ε_{ijk} es el efecto de la variación por aleatorización. Se considera que ε_{ijk} tiene una distribución normal con una media cuyo valor es cero y una varianza σ^2 . Para el análisis de este diseño estamos interesados en evaluar las siguientes pruebas de hipótesis:

- (i) Todos los tratamientos que implican los distintos niveles del factor A son iguales: Esto es $H_0^{(1)}$: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_r = 0$
- (ii) Todos los tratamientos que implican los distintos niveles del factor B son iguales: Esto es $H_0^{(2)}$: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_s = 0$
- (iii) La interacción entre el factor A y B en todos los tratamientos son iguales: Esto es $H_0^{(3)}$: $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ para todos los valores de i, j .

Con la finalidad de evaluar esas hipótesis definimos y_i como todas las observaciones en el i -ésimo nivel del factor A, $y_{j.}$ como todas las observaciones en el j -ésimo nivel del factor B, además $y_{.j}$ como el total de las observaciones en la ij -ésima celda de la interacción entre A y B, considérese también a “ y ” como el total de todas las observaciones. En este caso la suma de cuadrados estará definida por las ecuaciones (21) a la (25), en donde SC_T representa la suma de cuadrados total y SC_E la suma de cuadrados por el error de muestreo:

$$SC_T = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^t y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{rst} \quad (21)$$

$$SC_A = \frac{1}{st} \sum_{i=1}^r y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{rst} \quad (22)$$

$$SC_B = \frac{1}{rt} \sum_{j=1}^s y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{rst} \quad (23)$$

$$SC_{AB} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{rst} - SC_A - SC_B \quad (24)$$

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB} \quad (25)$$

2.6.2.1 Tablas de Análisis de Varianza (ANOVA).

Así mismo para analizar las hipótesis propuestas en el diseño factorial se calcula la razón de la distribución F al dividir el valor de la media de suma de cuadrado entre la media de suma de cuadrado del error o variación por aleatorización, para valores altos de tal proporción de la distribución F se considera rechazada la hipótesis nula. La información anterior se resume en la tabla 5 de Análisis de Varianza (ANOVA por sus iniciales en inglés).

Causa de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de Suma de Cuadrados	F proporción
Tratamientos de A	r-1	SS _A	MS _A =SS _A /(r-1)	MS _A /MS _E
Tratamientos de B	s-1	SS _B	MS _B =SS _B /(s-1)	MS _B /MS _E
Interacción AB	(r-1)(s-1)	SS _{AB}	MS _{AB} =SS _{AB} /(r-1)(s-1)	MS _{AB} /MS _E
Error residual	rs(t-1)	SS _E	MS _E =SS _E /rs(t-1)	
Total	rst-1	SS _T		

Tabla 5. Tabla de Análisis de varianza para un diseño factorial de 2 factores. Tomada de (Muralidharan, 2012).

2.6.2.2 Evaluación de un Diseño Factorial en Minitab®.

Para el análisis de varianza aplicado a un diseño factorial se puede ocupar el software Minitab® a modo de agilizar los cálculos y evaluar sus resultados. A continuación, se describe un caso para un diseño de 2 factores con 2 niveles, es decir r=s=2.

El primer paso consiste en generar en la hoja de cálculo un diseño factorial para alimentar los datos obtenidos. En la barra de herramientas se realiza la siguiente selección: *Stat> DOE> Factorial> Create factorial design*. Se despliega el menú detallado en la Figura 30 en el cual en la opción “design” se elige el tipo de diseño a evaluar y en la opción “Factors” se identifican los factores del estudio, así como sus valores que pueden ser numéricos o codificados.

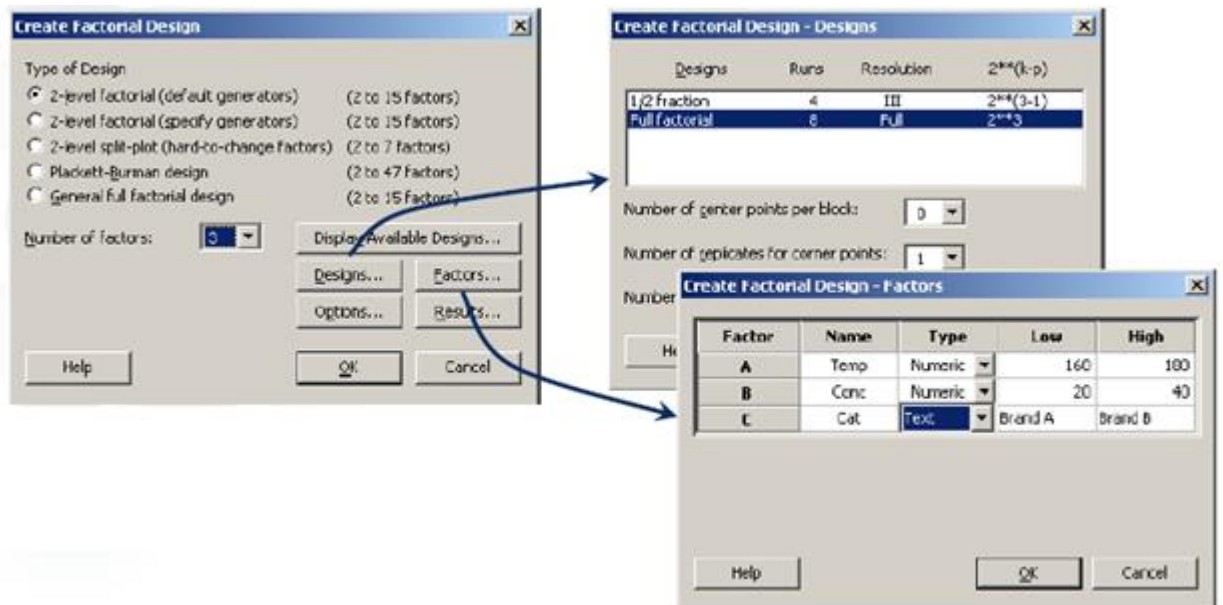


Figura 30. Ruta a seguir en el software Minitab® para crear un diseño factorial.

La tabla del diseño desplegada en Minitab se describe en la Figura 31, se puede apreciar que en la columna C-7 se escribe el resultado para cada tratamiento de la prueba.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Temperature	Concentration	Yield	
1	4	1	1	1	2	2		
2	6	2	1	1	1	2		
3	2	3	1	1	1	2		
4	10	4	1	1	1	2		
5	5	5	1	1	1	1		
6	9	6	1	1	1	1		
7	3	7	1	1	2	1		
8	12	8	1	1	2	2		
9	7	9	1	1	2	1		
10	8	10	1	1	2	2		
11	11	11	1	1	2	1		
12	1	12	1	1	1	1		
13								

Figura 31. Tabla de diseño factorial generada en Minitab®.

El análisis de Minitab® para un diseño de experimentos de 2 factores A y B se presenta en la Figura 32 en el área identificada como “A” se aprecia el P-value para el efecto atribuido por cada factor, así como para la interacción AB, considerando que para un P-value menor a 0.05 se debe desechar la hipótesis nula y considerar que el efecto del factor en la variable de respuesta es significativo.

MINITAB Full Factorial Design

Factors: 2 Base Design: 2, 4
Runs: 12 Replicates: 3
Blocks: 1 Center pts (total): 0

Factorial Fit: Yield versus Temperature, Pressure

Estimated Effects and Coefficients for Yield (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		90.5250	0.04488	2017.21	0.000
Temperature	0.2167	0.1083	0.04488	2.41	0.042
Pressure	0.3167	0.1583	0.04488	3.53	0.008
Temperature*Pressure	-0.0500	-0.0250	0.04488	-0.56	0.593

S = 0.155456 R-Sq = 69.91% R-Sq(adj) = 58.63%

Analysis of Variance for Yield (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	0.441667	0.441667	0.220833	9.14	0.009
2-Way Interactions	1	0.007500	0.007500	0.007500	0.31	0.593
Residual Error	8	0.193333	0.193333	0.024167		
Pure Error	8	0.193333	0.193333	0.024167		
Total	11	0.642500				

Estimated Coefficients for Yield using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	89.3167
Temperature	0.00366667
Pressure	0.00516667
Temperature*Pressure	-1.00000E-05

Figura 32. Tabla de resultados del diseño full factorial en Minitab®.

Minitab® también despliega las siguientes gráficas:

- ❖ *Pareto chart*: En esta se explica cuál de los factores tiene el máximo efecto.
- ❖ *Main Effects Plot*: Muestra el efecto en la variable de respuesta conforme se pasa de un nivel a otro en cada factor.
- ❖ *Interaction Plot*: Muestra en un solo gráfico el comportamiento de la variable de respuesta comparando todos los factores con sus respectivos niveles, si las rectas de los factores tienden a ser paralelas se considera que no hay interacción entre ellas.

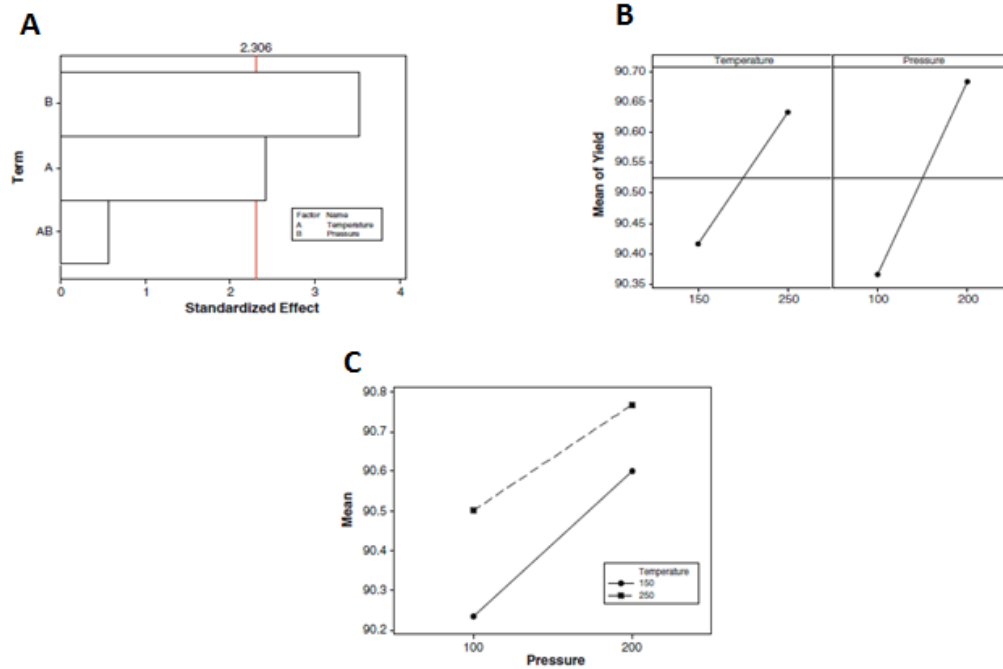


Figura 33. En la gráfica A se puede apreciar el Pareto Chart, la gráfica B muestra el Effects Plot y la gráfica C el Interaction Plot en Minitab®.

Una vez evaluada la interacción de los factores involucrados en el diseño de experimentos con los resultados arrojados en la Figura 32 podemos obtener el modelo de regresión para la variable de respuesta y los factores involucrados. Obsérvese en el área “B” que se despliegan los coeficientes del modelo para los factores codificados; de la misma manera, en el área “C” se despliegan los coeficientes para los factores no codificados.

Como consecuencia de identificar el modelo matemático debemos asegurar que este mismo es adecuado, para esto se deben analizar los valores residuales resultantes de comparar cada valor registrado en cada tratamiento contra el valor predicho por el modelo. El resultado de este análisis en Minitab se despliega en la Figura 34 en la cual se puede observar que si los valores residuales están distribuidos a lo largo de la línea de normalidad (Gráfica “Normal Probability Plots”) y su distribución es aleatoria (Gráfica “Residual versus the fitted values” y “Residuals versus the order of the data”) el modelo puede ser considerado como apto para predecir el valor de la variable de respuesta.

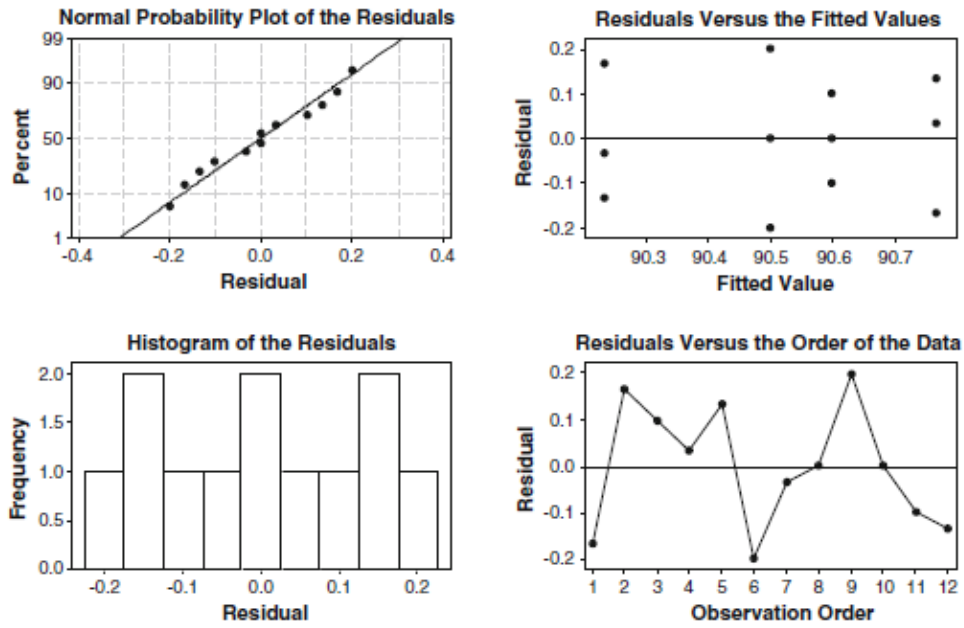


Figura 34. Gráficas del Análisis Residual en Minitab®.

2.6.3 Modelar la relación entre las variables.

2.6.3.1 Modelo Matemático.

Un modelo matemático es la descripción de un sistema usando conceptos y lenguaje numérico; es el marco de referencia para representar las características básicas de un sistema complejo a partir de unas cuantas relaciones centrales (Bender, 2000). A continuación, se explica una importante herramienta para el desarrollo de modelos matemáticos.

2.6.3.2 Análisis de Regresión en Minitab.

Una vez identificadas las variables significativas que tienen efecto en la variable de respuesta identificada es necesario establecer las relaciones que hay entre ellas. Para el caso más sencillo se cuenta con una variable de respuesta o variable dependiente denominada “y”, la cual se expresa en función del valor de una serie de variables independientes que se pueden denotar como $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, es decir, $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$. Si la relación entre estos parámetros es lineal, se puede expresar por la ecuación (30), en donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son constantes.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k \quad (26)$$

Sin embargo, debemos considerar que existe una desviación o error entre los valores predichos por el modelo y los obtenidos por la ecuación (26) por lo que hay que incluir un término de error ϵ . Para el caso que la ecuación sólo contenga una variable independiente se denomina *regresión simple* y para el caso contrario que se cuente con 2 o más variables independientes se denomina *regresión múltiple*.

Para obtener el valor de los coeficientes $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ se aplica el principio de mínimos cuadrados, los cuales en este trabajo se obtienen a través del software Minitab®.

Al respecto, el reporte de Minitab® se presenta en la Figura 35, vale la pena recalcar que en el área A se marcan los coeficientes obtenidos para el modelo matemático además que se debe considerar que para un P-value menor a 0.05 del área marcada como B se considera que el

coeficiente obtenido es estadísticamente significativo y representa un valor residual menor para los valores predichos en el modelo para la variable independiente.

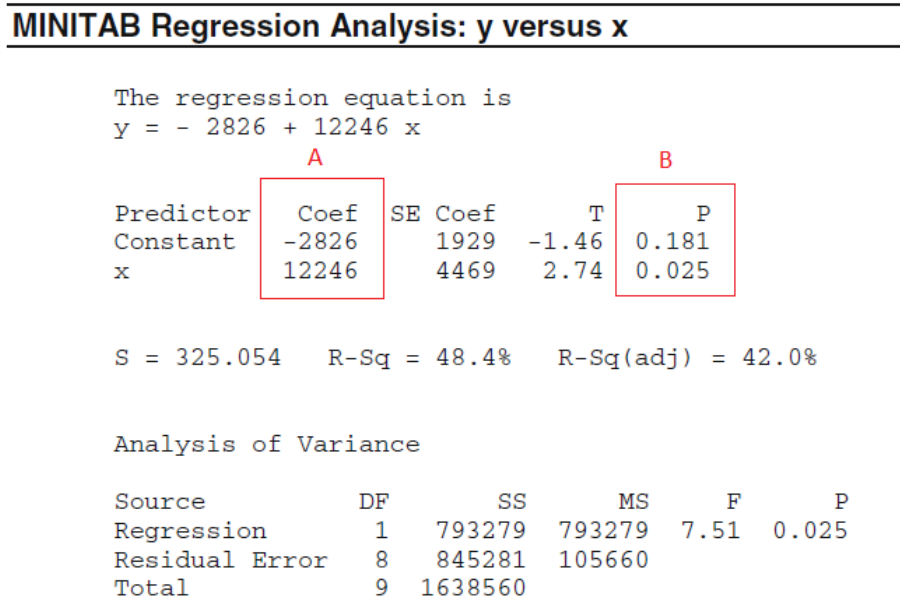


Figura 35. Reporte en Minitab® para una regresión simple.

Por otra parte, hubo interés en asegurar que el modelo desarrollado en este trabajo se ajustara en la mejor medida a los datos obtenidos de forma experimental; para asegurar lo anterior se usó el **coeficiente de determinación**, o R^2 , un número adimensional que indica qué tan bien se ajusta el modelo propuesto. Un valor R^2 de 1 indica un ajuste perfecto, así como un valor de 0 es indicativo de que el modelo no se ajusta a los datos en absoluto (Glantz, 1990). El análisis de Minitab arroja un valor de R^2 a fin de poder decidir sobre la idoneidad del modelo propuesto; sin embargo, debemos considerar que a medida que los datos que utilizamos en la creación de nuestro modelo son mayores, el valor de R^2 también se incrementa; de la misma manera, R^2 nos da un indicativo del ajuste de los datos usados más no de la predicción de la variable dependiente para distintos valores de la(s) variable(s) independiente(s). Para saber si nuestro modelo cumple esas características Minitab® reporta el valor de R^2_{adj} para analizar el impacto por el incremento de datos y R^2_{pred} para saber si nuestro modelo puede predecir datos que no corresponden a los tomados. Para estos casos se sigue el mismo criterio, un valor de 1 implica idoneidad del modelo y un valor de 0 carencia de ajuste.

2.6.3.3 Superficie de Respuesta.

Como un importante tema en el diseño de experimentos, la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM por sus iniciales en inglés) es una colección de técnicas estadísticas y matemáticas para analizar y modelar los problemas en los cuales la respuesta de interés está influenciada por varias variables y el objetivo es optimizar dicha respuesta (Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 2009). Como se explicó anteriormente en la sección referente a la regresión, la variable de respuesta se puede expresar de acuerdo a la ecuación (27) en donde la variable dependiente es “y”, las variables independientes son x_1 , x_2 además que el término del error experimental se denota como “ ε ”, se asume que el error experimental tiene una distribución normal con una media de cero y una varianza de s^2 .

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (27)$$

A causa de que en la mayoría de los problemas el modelo matemático es desconocido, para hacer una aproximación usualmente se inicia con un **modelo de primer orden** en caso de que la variable de respuesta pueda ser definida como una función lineal. Sin embargo, si en la superficie de respuesta hay curvatura, la función propuesta debe contener un polinomio con un grado mayor, usualmente este modelo es llamado **modelo de segundo orden** como se puede ilustrar en la ecuación (28).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_1 \beta_2 x_1 x_2 + \varepsilon \quad (28)$$

El análisis RSM se realiza graficando la función o modelo obtenido y su objetivo principalmente es (Oehklert, 2000):

1. Entender la “topografía” de la superficie de respuesta (máximo y mínimo local y las líneas de borde).
2. Encontrar la región en la cual la respuesta óptima ocurre. El objetivo es moverse a lo largo del camino para encontrar la máxima o mínima respuesta o el área donde se optimice el proceso.

Entonces la variable de respuesta puede ser representada gráficamente, en tres dimensiones o en una gráfica de contorno que ayuda a visualizar la forma de la superficie de la superficie de respuesta. Los contornos son curvas para valores constantes de la respuesta dibujadas en un plano de dos dimensiones y en el caso que el modelo tenga más variables independientes estas se dejan con valores fijos. Un ejemplo de la representación gráfica de la superficie de respuesta se muestra en la Figura 36.

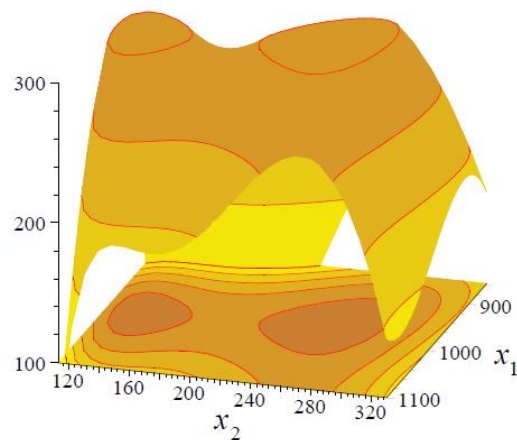


Figura 36. Ejemplo de superficie de respuesta y el correspondiente gráfico de contorno para un modelo con 2 variables independientes. Tomado de (Alvarez, 2000).

2.6.3.4 Análisis en Minitab® de la superficie de respuesta.

A fin de realizar el análisis del RSM en Minitab® se siguió la siguiente ruta en la barra de herramientas: Stat>DOE>Factorial>Define Custom Factorial Design, con la cual obtenemos los siguientes cuadros de diálogo de la Figura 37.

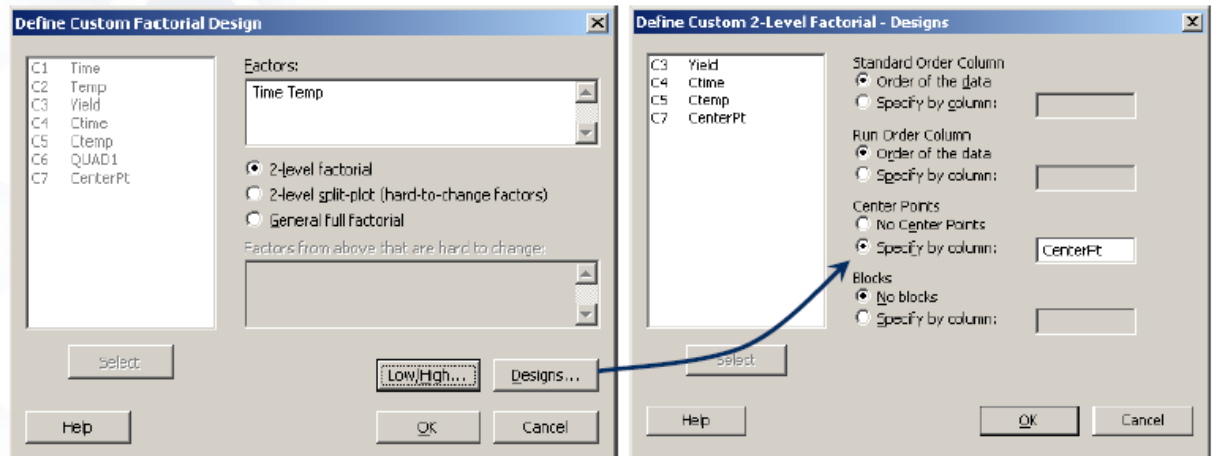


Figura 37. Cuadros de diálogo para la creación del diseño factorial para aplicar el RSM en Minitab®.

Posteriormente se reduce el modelo obtenido de acuerdo a lo expuesto en la sección 2.6.2.2, con el modelo reducido considerando las variables e interacciones que causan efecto significativo a nuestra variable de salida se procede con la siguiente ruta: Stat>DOE>Factorial>Contour/Surface Plots. Dependiendo del tipo de modelo (de primer o segundo orden) se obtienen las gráficas correspondientes que se ejemplifican en la Figura 38 con lo cual se puede hacer el análisis.

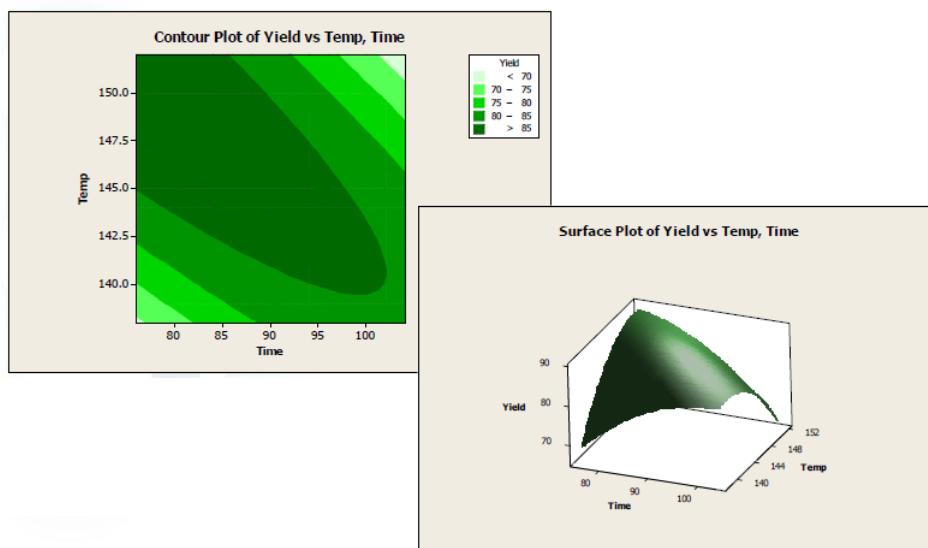


Figura 38. Gráfica de superficie y contorno para un modelo de segundo orden en Minitab®.

2.7 PROCESO DE CALANDREO DE PLÁSTICO.

La operación de calandreo consiste en pasar material entre dos rodillos metálicos con la finalidad de obtener una película de un espesor deseado (Macadam, 1907). El proceso de calandreo fue utilizado para mejorar el acabado de las superficies del papel y los textiles mucho antes de ser utilizado para procesar hule y termoplásticos. En 1836 E. M. Chafee patentó el primer calandro de 4 rodillos (White, 1990). En 1935 en la compañía Hermann Berstorff de Hanover, Alemania se desarrolló el proceso para calandrar el PVC y posteriormente durante el curso de la segunda guerra mundial y con la consecuente limitación para acceder al hule natural se generó una mayor sofisticación en el proceso de calandreo del PVC para ser usado como sustituto de esa materia prima (Simpson, 1995).

2.7.1 Configuración de los sistemas de Calandreo.

Se puede apreciar en la Figura 39 las configuraciones más usuales para los rodillos de un calandro. Se considera que la configuración en “Z inclinada” reduce el tiempo de residencia del PVC y con ello se evita el uso de estabilizadores térmicos. La configuración de “L” se utiliza con mayor frecuencia para procesar el PVC rígido para evitar acumulación de material en la parte superior del calandro y el riesgo de que caigan grumos en la parte inferior del mismo. En el caso del PVC plastificado no hay riesgo de generar grumos debido a la consistencia del material y la configuración de “L” invertida es la más usada.

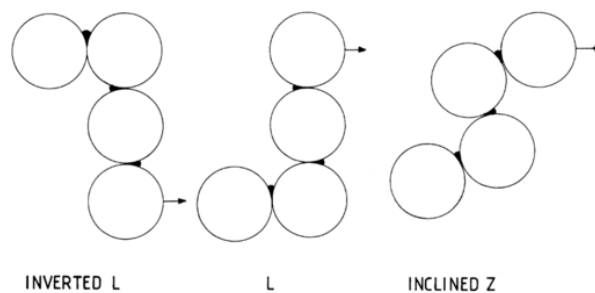


Figura 39. Configuraciones para los rodillos de un calandro. Tomado de (Simpson, 1995).

2.7.2 Los rodillos de calandreo.

Los materiales más usuales para la superficie de los rodillos de los calandros es el acero fundido debido a su resistencia o la superficie cromada debido al acabado que debe tener la película de PVC rígido. Para poder mantener la temperatura de la superficie del rodillo por lo general se utilizan rodillos perforados (ver Figura 40) en los cuales se asegura la recirculación del fluido de calentamiento y así evitar el anegado del mismo dentro del rodillo con la consecuente pérdida de control en la temperatura. A modo de compensar una posible deflexión de los rodillos es recomendable considerar el coronamiento de los mismos para obtener acabados precisos (Kuehn, 1965).

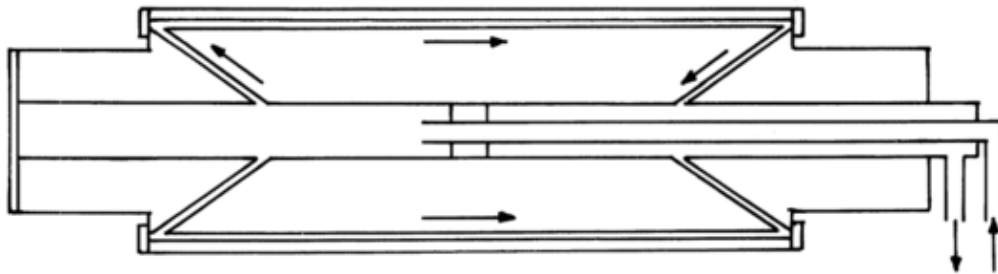


Figura 40. Circulación del fluido dentro de un rodillo de Calandro (Simpson, 1995).

CAPITULO 3

3 IMPLEMENTACION Y RESULTADOS.

3.1 HERRAMIENTAS ESTADISTICAS UTILIZADAS.

Debido a que la variable a medir, el espesor de la lámina de vinil para aislante acústico es una variable continua, se definieron las siguientes herramientas estadísticas de six sigma en este proyecto:

- ❖ Para el Análisis de Sistema de Medición un estudio cruzado de gage R&R con Análisis de Varianzas.
- ❖ Para definir la capacidad de proceso primeramente se realizó la prueba de normalidad Anderson-Darling y, posteriormente, una vez comprobada la distribución normal de los datos recolectados, se calculó la Capacidad de proceso (C_p) y los Defectos por millón de oportunidades (DPMO's).
- ❖ Después de observar en el análisis de capacidad de proceso que la media era cercana a la nominal se decidió para las pruebas de Hipótesis ocupar la herramienta 2 sample variances ya que esta prueba de hipótesis compara dos grupos de datos e indica si hay diferencia estadística en la varianza de los datos.
- ❖ En el caso de determinar la relación de las variables se aplicó un Diseño de Experimentos factorial cuyo resultado arrojó una gráfica de pareto que indica las interacciones significativas entre las variables a analizar.
- ❖ El valor de curvatura obtenido para el diseño de experimentos indicó que la relación entre el espesor de la lámina de vinil y las variables de proceso no llevan una relación lineal.
- ❖ Para determinar el modelo matemático entre la variable dependiente y las variables independientes se aplicó la herramienta de regresión por lo cual para los distintos modelos obtenidos se analizaron las gráficas residuales de las variables y

sus interacciones, así como el valor de R obtenido de Minitab a modo de discernir cual era el mejor modelo.

- ❖ De la ecuación obtenida en la regresión se aplicó una gráfica de contorno para determinar la especificación de las variables de proceso que aseguraran el valor del espesor de la lámina de vinil dentro de la especificación deseada.
- ❖ A modo de comprobar la mejora del proyecto se utilizó el comparativo de capacidad con datos iniciales del proyecto contra los datos obtenidos después de realizar la producción de la lámina de vinil durante ocho semanas con los valores propuestos como especificación de las variables significativas de proceso.
- ❖ Por último, se utilizó una gráfica de control con los datos recabados en las 8 semanas de mejoras para visualizar la proporción de defectos y evaluar la presencia de cualquier variable especial dentro de la fase de mejora.

3.2 FASE DE DEFINICIÓN.

En la empresa de autopartes donde se realizó la investigación de esta tesis en la junta diaria de operaciones dentro de la presentación de indicadores clave se reportó el siguiente Pareto de Scrap (Figura 41), en el cual se observó en el eje de las abscisas los diferentes productos que se elaboran ahí y en el eje de las ordenadas el respectivo costo por el scrap en pesos mexicanos durante el último año reportado para cada uno de ellos. Como se aprecia el producto que se reportó con mayor costo debido al scrap es el referente al programa del aislante térmico y acústico.

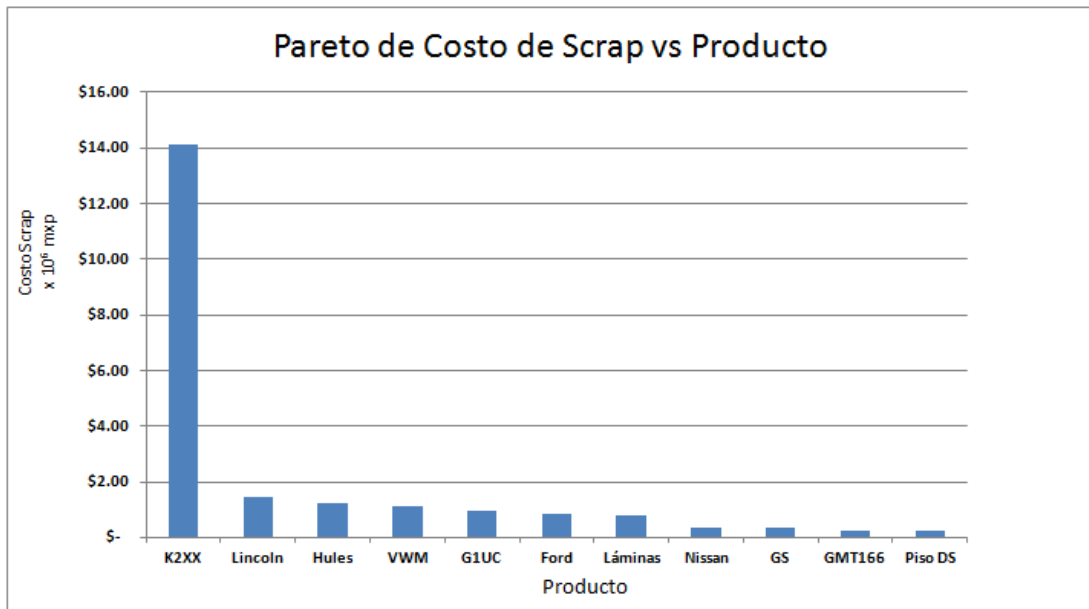


Figura 41. Pareto del costo de scrap por producto durante el año 2014.

Para conocer más a fondo la voz del cliente del proceso K2XX del aislante acústico se pidió al departamento de calidad un pareto de defectos de todas las estaciones que componen dicho proceso. En la Figura 42 se puede apreciar el pareto de defectos para el caso de la estación de termoformado de la lámina de vinil.

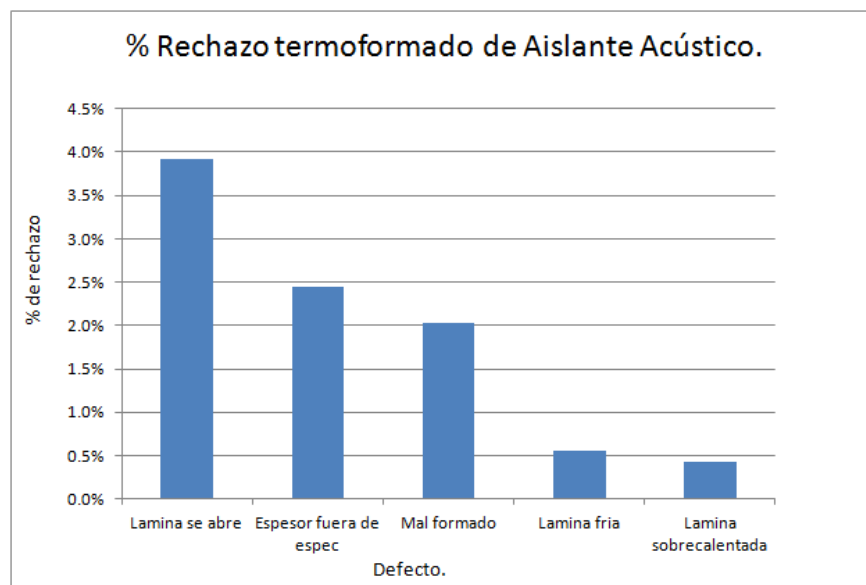


Figura 42. Pareto de rechazos para la estación de termoformado dentro del proceso de producción del aislante acústico.

Desde el inicio del programa de producción de aislante acústicos en el año 2013 se identificó dentro de los reportes de calidad como segundo contribuidor de rechazo al espesor fuera de especificación, la primer iniciativa para contrarrestar este problema surgió el 12 de Febrero de 2014 con la emisión de una alerta de calidad interna para la planta de autopartes y la subsecuente conformación de un grupo multidisciplinario para realizar el círculo de calidad, mediante la técnica de los “5 ¿por qué?” se concluyó como causa raíz para la obtención de láminas con espesor fuera de especificación fue la falta de monitoreo en la estación de evaluación por lo que se implementó el uso de un dispositivo manual “pasa-no pasa” para medir el espesor de la lámina en un intervalo de 10 piezas, la instrucción fue documentada en la hoja de proceso estándar así como en la hoja de Instrucción de Inspección.

La implementación de la medición manual del espesor no tuvo efecto en la reducción del rechazo del espesor por lo cual se programó la realización de un taller Kaizen en la empresa de autopartes en Octubre de 2014, el taller se enfocó a reducir el desperdicio de scrap de la lámina de vinil para aislante acústico debido al espesor fuera de especificación, para ello el equipo multidisciplinario que se integró decidió ocupar la herramienta de estandarización para poder monitorear y registrar el espesor de la lámina al momento de la producción y en su caso el operador realizara los ajustes necesarios en caso de monitorear un espesor fuera de especificación, dentro del alcance del kaizen también se evaluó el proceso a distintas velocidades de la línea de producción, sin embargo, no se pudieron establecer los parámetros óptimos de la producción debido a que ello requirió de un mayor análisis estadístico que no dio tiempo aplicar en la semana que duró el evento. El resultado principal implicó la actualización de formatos de inspección en las estaciones que conforman la línea de producción; sin embargo, en las semanas posteriores a la implementación de dichos formatos no se apreció la reducción del scrap de las láminas de vinil atribuido al espesor fuera de especificación.

De acuerdo al resultado del kaizen se observó relación entre las variables del proceso y el espesor de la lámina de vinil, sin embargo, por la duración del taller no se pudo profundizar en el análisis de tal relación. Debido a estas observaciones en enero de 2015 se presentó dentro de la

junta six sigma de la empresa de autopartes la variación de espesor de las láminas de vinil para aislante acústico como opción de proyecto six sigma.

Para tener certeza de que el proyecto a realizar realmente se ajustara a los lineamientos de six sigma se consultaron los lineamientos de selección de proyectos incluido en el procedimiento de mejora continua, el cual está basado en los lineamientos definidos por el master black belt y el director de mejora continua del corporativo de la empresa de autopartes. El staff gerencial de la empresa repasó junto con el black belt regional cada lineamiento de selección indicado en la Figura 43 para reducir el rechazo por variación de espesores de la lámina del aislante acústico y determinó que cumple con cada uno de ellos para poder considerar a six sigma como la metodología adecuada para reducir tal rechazo. En la Figura 3 (página 20) se presenta la minuta de la junta con el acuerdo para considerar la reducción de la variación de espesores de la lámina de vinil del aislante acústico como un proyecto six sigma.

6.11 Determinación de Proyectos Six Sigma

6.11.1 En la Junta del Lean Steering Committee cuando se revise el rubro de avances y estatus de proyecto Six Sigma, cada vez que un Black Belt o Green Belt Certificado o en su caso un Black Belt o Green Belt en proceso de certificación requiera iniciar un nuevo proyecto se consensará con el staff la determinación del proyecto de acuerdo a los siguientes criterios de elección de proyecto six sigma definidos a nivel corporativo en la presentación de i-net <http://inet. com/cd/op/ci/ss/index.htm> en la slide 90 referente a la selección de proyectos. **Para ser considerado un proyecto Six Sigma el defecto, problema o variación a atacar:**

- No debe tener una solución obvia o conocida.
- Debe tener un problema o defecto Medible.
- Debe estar vinculado a los objetivos y métricos de la planta.
- Debe tener el apoyo y la aprobación de la gerencia.
- Debe reducir variación o defectos.
- Debe tener un impacto positivo y medible en el cliente.
- No debe requerir una inversión o esta debe ser mínima.
- Se debe enfocar en mejorar los procesos existentes, antes que rediseñar los productos o procesos.

6.11.2 Una vez seleccionado el Proyecto se debe utilizar primeramente el formato:

<http://docs. com/ci/Six%20Sigma%20Files/IAC%20Project%20Charter.xls> en el cual se define y se autoriza el proyecto a realizar por el Gerente de Planta, una vez aprobado se procede a realizar el proyecto en formato de presentación <http://docs. com/ci/Six%20Sigma%20Files/Project%20Template.ppt> el cual indica los pasos de la metodología.

6.11.3 Al seleccionar el proyecto potencial se deben presentar los datos (Gráfico-reportes de Scrap, Reporte de costo de retrabajos, reportes de MOS, entre otros) en los cuales se muestre por qué se está priorizando la variación o defecto elegido en proyecto six sigma sobre otros problemas de calidad. Los acuerdos deben ser incluidos en la minuta del Lean Steering Committee y difundido al personal Salarv de la planta.

Figura 43. Procedimiento de Mejora Continua de la empresa de autopartes.

Una vez que se determinó que el defecto de la variación de espesor de la lámina de vinil del aislante acústico sería abordado mediante metodología six sigma, se definió al equipo de

trabajo, el cual quedó conformado de la siguiente forma de acuerdo al consenso del staff gerencial de la empresa de autopartes:

- **Dueño del proceso:** Gerente de Producción.
- **Líder de proyecto:** Ingeniero de Mejora Continua.
- **Mentor six sigma:** Black Belt Regional.
- **Miembros del equipo:** Ingeniero de Materiales y Proceso, Gerente de Mantenimiento, Líder de Producción, Operador de Calandro, Operador de cortadora de lámina, Supervisor de calidad.

Posterior a la conformación del equipo de trabajo se procedió a llenar la carta de proyecto (Figura 4) para formalizar el mismo, los datos que se presentaron fueron los siguientes:

- ❖ **Título del Proyecto:** Reducir variación de espesor en la lámina de vinil.
- ❖ **Líder del Proyecto:** Rogelio Fortunio Cortez.
- ❖ **Planta:** Puebla.
- ❖ **Número de proyecto:** 16993
- ❖ **Dueño del Proceso:** Gerente de Producción.
- ❖ **Declaración del Problema.** “Para la producción del aislante acústico, el proceso de termoformado reporta a la variación de espesor de la lámina de vinil como su segundo mayor contribuidor de rechazo (2.45 % de rechazo) en el año 2014”.
- ❖ **Críticos:** Entrega, Calidad, Costo, Seguridad, Medio Ambiente.
- ❖ **Objetivo del Proyecto:** Reducir al 50% los defectos por millón de oportunidades, de 61,728 a 30,824.
- ❖ **Definición del Defecto:** Cualquier lámina de vinil fuera de especificación (3.30 mm+/- 0.10 mm) en el espesor.
- ❖ **Miembros del equipo de Trabajo:** (Nombre de cada integrante).
- ❖ **Beneficio Financiero del proyecto:** 34,679 dólares americanos (513,249 pesos mexicanos al tipo de cambio de 14.80 mxp/USD en Enero 2015) por consumo de energía y mano de obra por reprocesar anualmente 130 toneladas de láminas de vinil.

En la Figura 44 se puede apreciar al aislante acústico el cual consta de una lámina de vinil termoformado recubierta en un lado de una capa de poliuretano aplicada mediante inyección a alta presión. El aislante acústico se muestra desde el lado no recubierto de poliuretano que corresponde a la lámina de vinil.



Figura 44. Aislante acústico.

3.3 FASE DE MEDICIÓN.

Se identificó al espesor de la lámina de vinil como una variable continua debido a que este puede tomar un número infinito de valores dentro de un rango especificado, en particular la especificación del espesor de la lámina de vinil es de 3.20 a 3.40 mm.

Dado que la variable a analizar fue identificada, se procedió a definir el método de medición del espesor a fin de llevar a cabo el estudio de repetibilidad y reproducibilidad. El método de medición que se propuso constó de 10 puntos marcados con un círculo de 0.5 cm de diámetro en cinco láminas distintas en posiciones aleatorias, las mediciones del espesor se realizaron con un micrómetro manual marca Mitutoyo® (ver Figura 45) con código de identificación ELA 035, controlado por el departamento de calidad e incluido en el programa de calibración. Se eligieron de acuerdo al perfil de sus actividades a 3 auditores de distintos departamentos (calidad, producción e ingeniería) los cuales midieron dos veces las láminas en días distintos y en orden aleatorio, los datos obtenidos se registraron de forma separada para cada auditor y fueron entregados al líder del proyecto.



Figura 45. Micrómetro Manual marca Mitutoyo® ocupado para obtener datos de espesor de las láminas de vinil.

Con la intención de obtener el porcentaje de variación atribuida a la medición del espesor los datos obtenidos del estudio de repetibilidad y reproducibilidad fueron analizados mediante Minitab®. De acuerdo al reporte mostrado en la Figura 46 se obtuvo una variación de 4.32% atribuida a la comparación de datos tomados por el mismo auditor (repetibilidad). De igual forma se obtuvo una variación de 3.04% atribuida a la comparación de datos tomados por diferentes auditores (reproducibilidad). El valor total del estudio de repetibilidad y reproducibilidad que se obtuvo fue de 5.28% que de acuerdo a (Gijo, 2013) al ser menor de 10% se consideró confiable.

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.0052352	0.031411	5.28	15.71
Repeatability	0.0042817	0.025690	4.32	12.85
Reproducibility	0.0030123	0.018074	3.04	9.04
Operators	0.0000000	0.0000000	0.00	0.00
Operators*Parts	0.0030123	0.018074	3.04	9.04
Part-To-Part	0.0990716	0.594430	99.86	297.21
Total Variation	0.0992098	0.595259	100.00	297.63

Figura 46. Resultado del estudio R&R analizado en Minitab®.

Visto que el método de medición propuesto es confiable y que la variación atribuida a él no es significativa se realizó el estudio de capacidad de proceso; para ello se definió el siguiente plan para la toma de datos:

- Se decidió hacer el muestreo aleatorio simple a lo largo de una semana de producción.
- Tomando en cuenta que los tres operadores de la estación de calandro se encontraban dentro de la matriz de habilidades para realizar la operación medición de espesores, se les designó como los responsables para la toma de datos.
- Se aplicó la ecuación 1 para determinar el tamaño de la muestra. Se consultó al Black Belt regional y sugirió los siguientes parámetros para el cálculo del tamaño de la muestra: El tamaño de la población de la producción de 1 semana $N=15,000$ piezas, un margen de confiabilidad del 95% por lo que $Z=1.645$ (ver tabla 2 del Anexo), una desviación estándar estimada $S=0.50$ y un error máximo del 7.5% ($E=0.075$). El tamaño mínimo calculado de la muestra fue de 119 piezas.
- Se solicitaron al menos 10 datos por turno tomados de forma aleatoria a lo largo de los 7.5 horas que dura cada turno.
- Se recolectaron 162 datos durante la semana.

En cuanto a los datos obtenidos estos se registraron en el software Minitab® y se realizó el análisis de capacidad de proceso, para ello se utilizó la opción de Quality Tools>Process Capability; en el cuadro de dialogo desplegado se indicó la columna C1 donde se copiaron los datos medidos y se indicó el límite inferior (3.20 mm) y superior (3.40 mm) de la especificación. El software arrojó la gráfica de capacidad indicada en la Figura 47 en la cual se puede apreciar que el valor de Cpk es igual a 0.54 coincidente con el CPU o índice de capacidad superior lo cual indicó que el comportamiento del espesor es descentrado hacía el límite superior. El valor de CPL o índice de capacidad inferior igual a 0.97 mostró que la probabilidad de rechazar láminas con espesor debajo de la especificación inferior o “lámina delgada” es menor que el rechazo para láminas con espesor mayor a la especificación superior o “lámina gruesa”. El índice de capacidad Cp con un valor de 0.97 mostró la dispersión del espesor y aunque se acercó al mínimo aceptable de 1.33 se observa que la media calculada de 3.32833 mm es muy cercana al valor nominal de la especificación por lo que se optó por buscar reducir la variabilidad antes que el centrado del proceso.

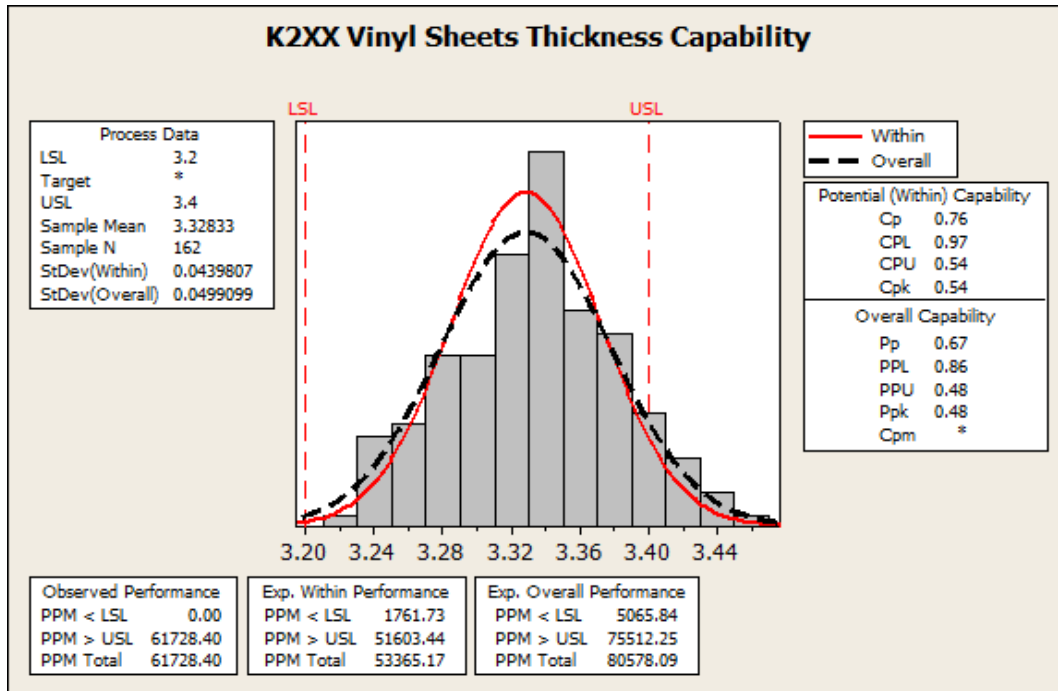


Figura 47. Capacidad de proceso analizada en Minitab®.

Otra característica importante reportada en el estudio de capacidad de proceso realizado en Minitab® fueron los defectos por millón de oportunidades (DPMO), el dato que se obtuvo fue de 61,728 defectos por millón de oportunidades lo cual indica que un 6.2% de las láminas producidas tendrían un espesor mayor al límite superior de 3.40 mm marcado en la especificación.

Por otra parte, para el cálculo del índice Z y a fin de determinar el objetivo del proyecto se utilizó una hoja de cálculo provista por el master black belt de la empresa de autopartes la cual se ilustra en la Figura 48. Asimismo, se consideró la regla del 90/50 la cual indica que para valores obtenidos del indicador Z menores a 3 se debe buscar una reducción de los DPMO's del 90%. Por el contrario, un valor igual o mayor a 3 para el índice Z establece un objetivo del 50% de los DPMO's. Como se aprecia en las celdas superiores se indicaron el número de mediciones obtenidas en la recolección de datos y la cantidad de ellos que estuvieron fuera de la tolerancia de 3.20 mm a 3.40 mm, el índice Z calculado fue de 3.040 por lo cual se estableció como objetivo del proyecto reducir los DPMO's en un 50% de los obtenidos en el estudio de capacidad de proceso.

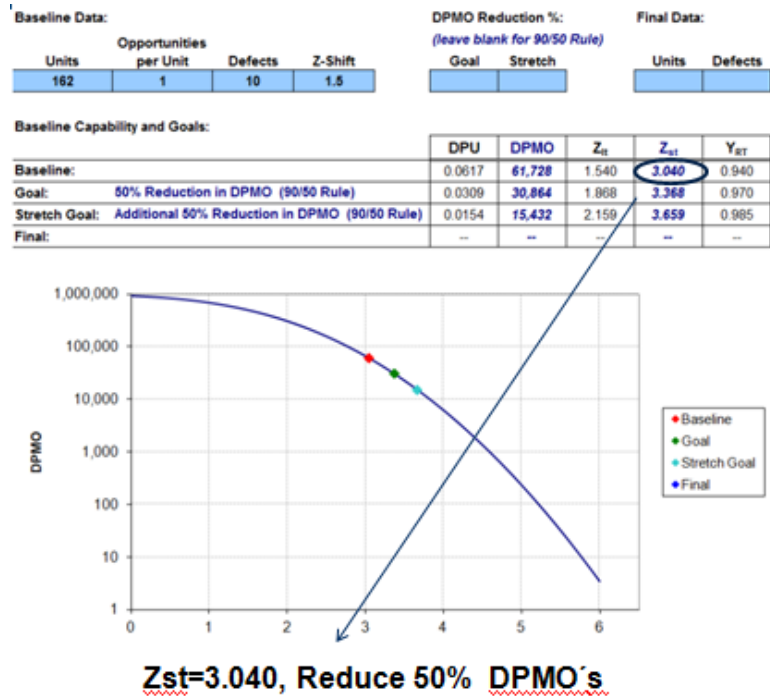


Figura 48. Hoja de cálculo para el factor Z y determinación del objetivo del proyecto.

3.4 FASE DE ANÁLISIS.

Para comenzar la fase de análisis el equipo de trabajo analizó el diagrama de flujo para entender todos los pasos en la producción de láminas de vinil. En la figura 49 se indica el diagrama de flujo de la línea Banbury en donde se produce la lámina de vinil para el aislante acústico. Se puede apreciar que el proceso empieza en la parte superior del diagrama en donde se pesan los materiales de la fórmula de vinil, posteriormente el material se introduce en el mezclador banbury (Farrel Modelo D11); el mezclador consta de dos rotores de 2 alas tangenciales movidos por medio de un motor de 500 HP. Después de un ciclo de 250 a 350 segundos y en un rango de temperaturas de 185 a 187 grados centígrados, la fórmula de vinil se descarga sobre 2 rodillos para homogenizar completamente la carga mineral sin mezclar y posteriormente se transporta a la estación de calandro de diseño de "L invertida", en donde se ajusta el espesor de la lámina mediante el movimiento de los rodillos inferiores, controlado por el operador. A continuación, mediante dos bandas se realiza la transportación del material laminado a una serie de rodillos de enfriamiento en donde el material tiene contacto con una superficie a 20 grados centígrados para posteriormente salir a una temperatura promedio de 35 grados centígrados, después la tira de

vinil pasa por una cortadora de cuchilla inclinada de acero inoxidable en donde se corta el largo de la lámina para posteriormente ser estibada.

El equipo identificó la estación de calandreo y las bandas transportadoras como las estaciones clave en donde se define el espesor de la lámina ya que en el calandro se ajusta el espesor mediante la abertura entre los rodillos inferiores del arreglo de “L invertida”. Por lo que se refiere a las bandas, transportan el material que sale del calandro hacia los rodillos de enfriamiento y una velocidad excesiva puede estirar el material o, en caso contrario, si las bandas se mueven muy lento pueden hacer que el material se acumule antes de pasar a los rodillos de enfriamiento.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO



















Nivel de Ingeniería:	0		Fabricado:										
Elaboro:			Equipo:	Ingeniería, Manufactura, Materiales y/o Procesos y Calidad.									
Simbología	 = Entradas de material Materia prima & componentes		 = Operacion	 = Inventario									
	 = Aceptar/Rechazar otra decision other decision		 = Inspeccion	 = Envio al cliente									
	 = Ruta/Transporte		 = Empaque	 = Operacion manual									
Escriba una "X" bajo el símbolo correspondiente en el cuadro de abajo que representa el paso en el proceso . (Nota: más de una casilla puede marcar) .													
Pasos										Descripcion	Descripcion de Operacion o Evento	Responsable	Evaluacion y Analisis del Metodo
110	x		x							100 Recepcion y manejo de materia prima	Recibir materia prima	1 Montacarguista	
120						x					Inspeccionar materia prima	1 Auditor de calidad	
130			x								Transportar materia prima al almacen	1 Montacarguista	
140								x			Almacen de materia prima	1 Almacenista	
150			x								Transportar materia prima al almacen	1 Montacarguista	
210			x							200 Prepesado	Trasladar material con el patin a bascula de pesaje M5	1 Operador	
220		x		x							Pesar material en bascula	1 Operador	
230		x		x							Pesar y colocar en paquetes de bolsas plasticas de cada materia	1 Operador	
240				x							Trasladar paquetes a riel de operador de carga manual	1 Operador	
310				x						300 Pesado y traspaso de material	Trasladar material al riel de la carga manual con ayuda de patin	1 Operador	
320		x		x							Pesar material en caja segun se especifique	1 Operador	
330				x							Trasladar material mediante riel a carga manual	1 Operador	

Figura 49. Diagrama de flujo del proceso de producción de láminas de vinil

410				x						400 Carga manual	Introducir a mixer material que llega del riel y material pesado en bascula F1 SBR 1712	1 Operador	
420				x							Bajar martinete al haber sido introducido el material con el peso especificado en formula	1 Operador	
430		x									Mezclar material	N/A	
440					x						Subir martinete una vez que el materia ya se este procesando	1 Operador	
450					x						Alimentar mezcla con componentes prepesados de cajas	1 Operador	
520					x					500 Proceso de materiales en Mill	Abrir compuerta a la descarga del batch accionando palanca al costado izquierdo de la mill	1 Operador	
530		x			x						Alimentar rodillos del Mill revolviendo el material del batch	N/A	
540					x						Accionar palanca para activar cuchillas de corte en Mill dando las dimensiones de acuerdo a las especificaciones	1 Operador	
550		x			x						Alimentar Callender traspasando parte del material del batch con banda transportadora	1 Operador	
560		x									Alimentar callender con material	1 Operador	
610					x					600 Rodillos traseros de callender	Retirar material sobrante de rodillo de callender con espátula	1 Operador	
620					x						colocar sobrante por sobre el rodillo #1 del Callender	1 Operador	
630		x			x						Alimentar rodillos de callender	1 Operador	
710		x								700 Parametros en Callender	Alimentar banda con batch	1 Operador	
720						x					Checar espesor de acuerdo a especificaciones de ambos lados de la lamina cada 5 a 10 min	1 Operador	
730		x			x						Ajustar parametros como son temperatura, velocidad, etc. (Si aplica)	1 Operador	
810					x					800 Enfriamiento y corte de laminas	Rociar agua al comienzo del batch para enfriarlo	1 Operador	
820					x						Amarrar comienzo de batch con lazo	1 Operador	
830					x						Guiar con lazo el batch por los rodillos de enfriamiento	1 Operador	
840		x									Enfriar batch	N/A	
850					x						Cortar comienzo de batch a la salida de los rodillos	1 Operador	
860		x			x						Alimentar cortadora con batch	2 Operadores	
870		x									Cortar lamina	N/A	
880					x						Acomodar lamina saliente de la cortadora en tarima	2 Operadores	
890						x					Verificar en mesa de evaluacion las dimensiones de la lamina en produccion cada 10 piezas	2 Operadores	
895					x						Colocar etiqueta en tarima completa	1 Operador	
910					x					900 PT	Trasportar a almacén producto terminado	1 Montacarguista	
920					x				x		Embarque a Cliente	1 Montacarguista	

Figura 49. Diagrama de flujo del proceso de producción de láminas de vinil

Puesto que el análisis del diagrama de proceso dio las bases para seleccionar las estaciones críticas en las cuales el espesor de la lámina se ve afectado, el equipo del proyecto de acuerdo a la directriz del black belt regional de la empresa de autopartes decidió seguir la siguiente metodología para la elección de las variables potenciales:

- Análisis de la AMEF de Proceso para seleccionar causas potenciales para el modo de falla de espesor de lámina de vinil fuera de especificación.
- Análisis del Diagrama de Ishikawa centrándose en el problema de variación de espesor en la lámina de vinil y considerando las categorías Material, Mano de Obra, Método, Maquinaria, Medición y Medio Ambiente.
- Ponderar las variables potenciales utilizando una matriz causa y efecto relacionando cada causa con los efectos definidos por el equipo en el producto.
- Las variables potenciales con mayor calificación obtenidas en la matriz causa y efecto serían evaluadas con pruebas de hipótesis. En caso de que el resultado de las pruebas de hipótesis fuera mayor de 0.05 para el valor P de todas las variables se repetiría la metodología para la nueva elección de las variables potenciales.

De acuerdo a la metodología propuesta se procedió a analizar la AMEF de proceso de las estaciones evaluadas en el diagrama de flujo. Se buscó en la AMEF las causas relacionadas con el modo de falla de espesor fuera de especificación de la lámina de vinil y se eligieron aquellas causas cuyo valor de Número Prioritario de Riesgo (NPR) fueran mayores para considerarlas como variables potenciales que causan la variación de espesor de las láminas de vinil. Se identificó a la temperatura de la fórmula como la mayor causa potencial de la variación de espesor de la lámina de vinil con un NPR de 142.

Posterior al análisis de la AMEF de proceso para la producción de lámina de vinil el equipo del proyecto se reunió para hacer el análisis de Diagrama de Ishikawa; el resultado de la reunión se observa en la Figura 50, en donde se consensaron las causas potenciales por cada categoría. Se puede apreciar que de acuerdo al consenso del equipo de proyecto se decidió que la categoría de Medición y Medio Ambiente no aportaban causas que originaran la variación de espesor de las láminas de vinil. La decisión para la categoría de Medición fue sustentada por el estudio R&R

que se realizó en la fase de Medición del proyecto al obtener un 5.28% de variación atribuible al error de medición; por parte de la categoría de Medio Ambiente se separaron las mediciones obtenidas en la recolección de datos por grupos de aquellos que se tomaron en el primer turno y tercer turno; con el grupo de datos se realizó un análisis de prueba de hipótesis en Minitab® para ver si existía diferencia estadística entre ambos grupos. El resultado se observa en la Figura 51, donde se puede apreciar un valor de P igual 0.792, con lo cual la Hipótesis nula (desviación estándar igual para ambos grupos de datos) se mantuvo.

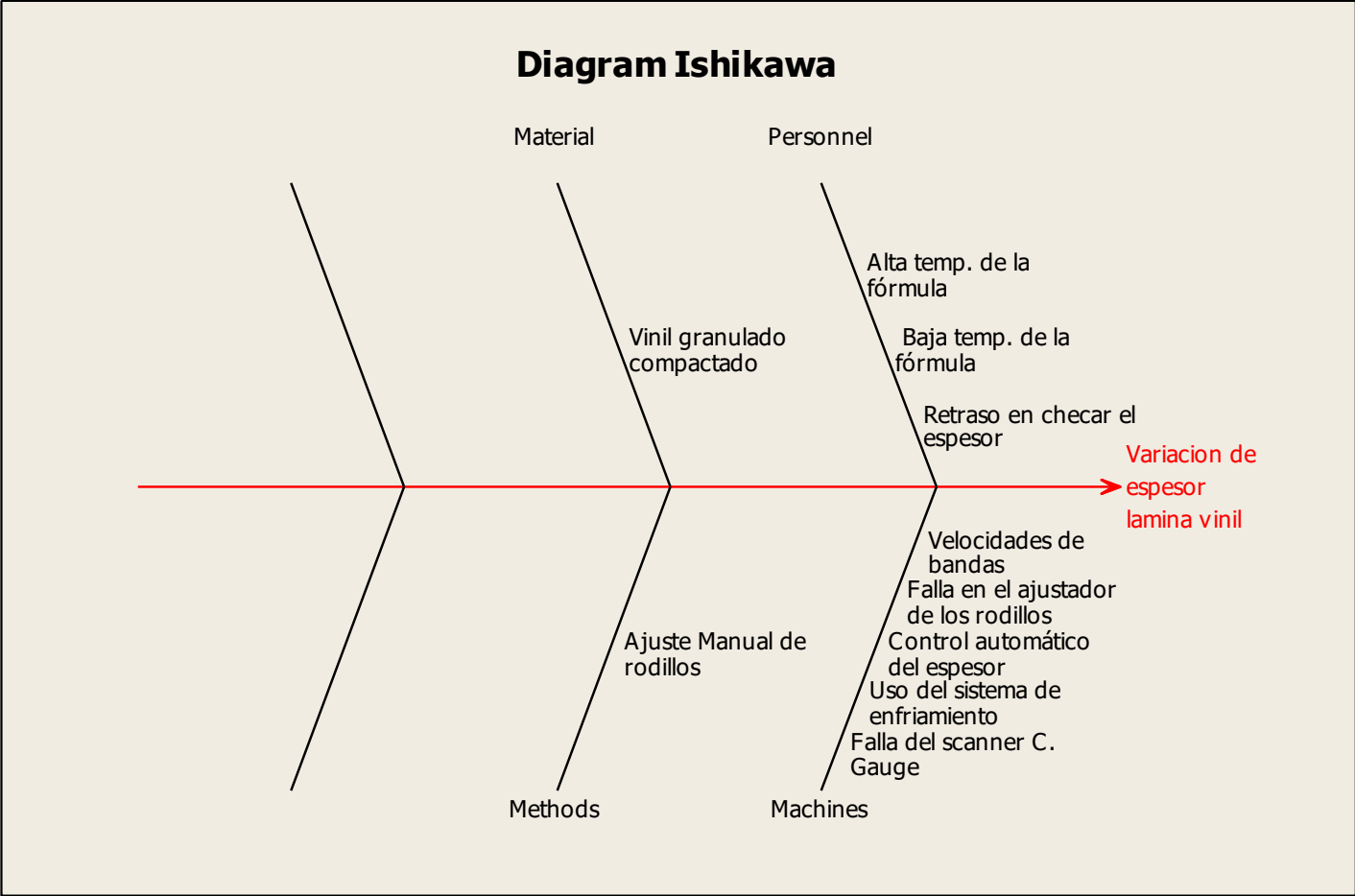


Figura 50. Diagrama de Ishikawa realizada por el equipo del proyecto para el defecto de variación de espesores.

SHIFT TO SHIFT



Is the output different between shifts?

Test and CI for Two Variances: 1er turno, 3er turno

Method
Null hypothesis Sigma(1er turno) / Sigma(3er turno) = 1
Alternative hypothesis Sigma(1er turno) / Sigma(3er turno) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Table with 5 columns: Method, DF1, DF2, Statistic, P-Value. Rows include F Test (normal) and Levene's Test (any continuous). P-values 0.792 and 0.746 are circled in red.

DAY TO DAY



Is the output vary day to day?

Test and CI for Two Variances: Lunes, Martes

Method
Null hypothesis Sigma(Lunes) / Sigma(Martes) = 1
Alternative hypothesis Sigma(Lunes) / Sigma(Martes) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Table with 5 columns: Method, DF1, DF2, Statistic, P-Value. Rows include F Test (normal) and Levene's Test (any continuous). P-values 0.627 and 0.734 are circled in red.

WEEK TO WEEK



Is the output vary week to week?

Test and CI for Two Variances: Semana 29, Semana 30

Method
Null hypothesis Sigma(Semana 29) / Sigma(Semana 30) = 1
Alternative hypothesis Sigma(Semana 29) / Sigma(Semana 30) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Table with 5 columns: Method, DF1, DF2, Statistic, P-Value. Rows include F Test (normal) and Levene's Test (any continuous). P-values 0.792 and 0.746 are circled in red.

Figura 51. Pruebas de hipótesis para las familias de variación para determinar diferencia estadística entre distintos turnos y días de producción.

Las 10 causas potenciales que se obtuvieron para la variación de espesor de la lámina de vinil se registraron en una matriz de causa y efecto en la cual se definieron las siguientes características clave del proceso: la lámina con defecto en la superficie (calificación de importancia al cliente de 1), lámina gruesa (calificación de importancia al cliente de 3) y lámina delgada (calificación de importancia al cliente de 3). La calificación relacionando cada causa potencial con las características clave se definió mediante votación del equipo del proyecto y previo acuerdo antes de ser registradas en la matriz. El resultado obtenido se muestra en la Figura 52. Por acuerdo del equipo del proyecto se consideraron las causas con puntuación mayor a 50 para ser analizadas mediante pruebas de hipótesis, dichas variables definidas en la fase de análisis fueron:

- La velocidad de las bandas transportadoras (calificación 54).
- Uso del sistema de enfriamiento (calificación 54).
- Alta temperatura de la fórmula (calificación 63).
- Baja temperatura de la fórmula (calificación 63).

MATRIX CAUSA Y EFECTO				
Rango de importancia al cliente	1	3	3	
Entrada del proceso	Lámina con defecto en la superficie	Lamina Gruesa	Lamina Delgada	TOTAL
Velocidades de bandas transportadoras	0	9	9	54
Uso del sistema de enfriamiento	0	9	9	54
Alta temp. de la fórmula	9	9	9	63
Baja temp. de la fórmula	9	9	9	63
Vinil granulado compactado	4	4	4	28
Ajuste Manual de rodillos	0	1	1	6
Retraso en checar el espesor	0	4	4	24
Falla Control automático del espesor	0	1	1	6
Control automático del espesor	0	1	1	6
Falla del scanner C. Gauge	0	1	1	6

Figura 52. Matriz causa y efecto definida por el equipo de proyecto para la variación de espesor de láminas de vinil.

Puesto que el análisis de la matriz causa y efecto arrojó las siguientes causas potenciales de la variación de espesor de la lámina de vinil para aislante acústico:

- La temperatura baja de la fórmula de vinil.
- La temperatura alta de la fórmula de vinil.
- El uso del sistema de enfriamiento de la banda 1.
- La variación de las velocidades de las bandas transportadoras.

se programó la toma de datos para la prueba de hipótesis de la siguiente forma para cada causa potencial:

- **La temperatura baja de la fórmula de vinil:** Se tomaron 45 datos de espesor de la lámina con la descarga de la fórmula de vinil a 150 grados centígrados desde la cámara de mezclado.
- **La temperatura alta de la fórmula de vinil:** Se tomaron 45 datos de espesor de la lámina con la descarga de la fórmula de vinil a 190 grados centígrados desde la cámara de mezclado.
- **El uso del sistema de enfriamiento de la banda 1:** Se tomaron 45 datos usando el sistema de esparcido de agua para enfriar la lámina de vinil, se tomaron 45 datos sin usar el sistema de esparcido de agua para enfriar la lámina de vinil.
- **La variación de las velocidades de las bandas transportadoras:** Se tomaron 45 datos de espesor a una velocidad de un rango de 13.5-14 m/min para una velocidad considerada alta. Se tomaron 45 datos a una velocidad de 10-10.5 m/min para una velocidad considerada baja. Para tomar la velocidad se usó un tacómetro manual que fue provisto por el departamento de calidad.

Posteriormente se tomaron 45 datos a condiciones controladas para los siguientes parámetros de proceso: Temperatura de descarga de la fórmula de vinil: 172.5 grados centígrados, velocidad de las bandas transportadoras: 12 m/min. Las condiciones anteriormente descritas se mantuvieron durante una hora de producción en las cuales se obtuvieron 320

láminas de vinil; los 45 datos fueron medidos cada 6 láminas para obtener una muestra de datos representativo durante la hora de producción con los parámetros anteriormente definidos.

Con la colección de datos obtenidos para cada causa potencial y para las condiciones estándar de producción se procedió a registrarlos (Figura 54) y a continuación se realizó el análisis de prueba de hipótesis, todo en Minitab®, comparando la colección de datos de cada causa potencial con la colección de parámetros de proceso a condición estándar, para ello se utilizó la opción “2 variances”.

Con respecto a la temperatura baja de la fórmula de vinil (150 grados centígrados) el valor de P que se obtuvo fue igual a 0.464 como se observa en la Figura 53, con el valor de P obtenido mayor a 0.05 se concluyó que la temperatura baja no era una variable vital para la variación de espesor de la lámina de vinil.

Test and CI for Two Variances: BASELINE, FORMULA FRIA				95% Confidence Intervals				
Method				Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio		
Null hypothesis	Sigma(BASELINE) / Sigma(FORMULA FRIA) = 1			Normal	(0.826, 1.503)	(0.682, 2.258)		
Alternative hypothesis	Sigma(BASELINE) / Sigma(FORMULA FRIA) not = 1			Continuous	(0.815, 1.575)	(0.664, 2.480)		
Significance level	Alpha = 0.05							
Statistics				Tests				
Variable	N	StDev	Variance	Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
BASELINE	45	0.098	0.010	F Test (normal)	44	44	1.24	0.477
FORMULA FRIA	45	0.088	0.008	Levene's Test (any continuous)	1	88	0.54	0.464

Figura 53. Resultado de la prueba de hipótesis para la temperatura baja de la fórmula de vinil.

Por otro lado, el análisis en Minitab® de prueba de hipótesis para la temperatura alta (190 grados centígrados) arrojó un valor de P de 0.000 como se aprecia en la Figura 54, por consiguiente, se consideró a la temperatura alta vital para la variación de espesores.

Test and CI for Two Variances: BASELINE, FORMULA CALIENTE				Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio		
Method				Normal	(1.301, 2.367)	(1.692, 5.602)		
Null hypothesis				Continuous	(1.367, 2.631)	(1.870, 6.924)		
Alternative hypothesis								
Significance level								
Alpha = 0.05								
Statistics				Tests				
Variable	N	StDev	Variance	Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
BASELINE	45	0.098	0.010	F Test (normal)	44	44	3.08	0.000
FORMULA CALIENTE	45	0.056	0.003	Levene's Test (any continuous)	1	88	14.08	0.000

Figura 54. Resultado de la prueba de hipótesis para la temperatura alta de la fórmula de vinil.

Para el caso del sistema de enfriamiento, se comparó la producción con y sin el uso de espreado de agua para enfriar la lámina de vinil que sale del calandro y el análisis en Minitab® de prueba de hipótesis dio como resultado un valor de P de 0.387 (Figura 55), de tal forma que el uso del espreado de agua de enfriamiento no se consideró vital para la variación de espesores.

Test and CI for Two Variances: BASELINE, ESPREADO				Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio		
Method				Normal	(0.845, 1.538)	(0.715, 2.367)		
Null hypothesis				Continuous	(0.894, 1.734)	(0.799, 3.005)		
Alternative hypothesis								
Significance level								
Alpha = 0.05								
Statistics				Tests				
Variable	N	StDev	Variance	Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
BASELINE	45	0.098	0.010	F Test (normal)	44	44	1.30	0.387
ESPREADO	45	0.086	0.007	Levene's Test (any continuous)	1	88	1.71	0.195

Figura 55. Resultado de la prueba de hipótesis para el uso de espreado de agua de enfriamiento en la lámina de vinil.

Con respecto a la velocidad alta de las bandas transportadoras (13.5-14 m/min), la Figura 56 muestra que el valor de P obtenido fue de 0.002 en el análisis de prueba de hipótesis de Minitab®, por lo cual una velocidad alta de la banda se consideró vital para la variación de espesores de la lámina de vinil.

Test and CI for Two Variances: BASELINE, MAYOR VELOCIDAD				Distribution of Data		CI for StDev Ratio		CI for Variance Ratio	
Method				Normal	(1.200, 2.184)	(1.440, 4.768)			
Null hypothesis				Continuous	(1.209, 2.192)	(1.462, 4.805)			
Alternative hypothesis									
Significance level									
Alpha = 0.05									
Statistics				Tests					
Variable	N	StDev	Variance	Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value	
BASELINE	45	0.098	0.010	F Test (normal)	44	44	2.62	0.002	
MAYOR VELOCIDAD	45	0.060	0.004	Levene's Test (any continuous)	1	88	9.78	0.002	

Figura 56. Resultado de la prueba de hipótesis para una velocidad alta (13.5-14 m/min) de la banda transportadora de la lámina de vinil después de la estación de calandro.

En lo que se refiere a la velocidad baja de las bandas transportadoras (10-10.5 m/min), en el análisis de prueba de hipótesis de Minitab® el valor de P que se obtuvo fue igual a 0.000 (Figura 57), por lo que la velocidad baja de la banda se consideró vital para la variación de espesores de la lámina de vinil.

Test and CI for Two Variances: BASELINE, MENOR VELOCIDAD				95% Confidence Intervals					
Method				Distribution of Data		CI for StDev Ratio		CI for Variance Ratio	
Null hypothesis				Normal	(1.420, 2.584)	(2.016, 6.676)			
Alternative hypothesis				Continuous	(1.511, 2.986)	(2.283, 8.916)			
Significance level									
Alpha = 0.05									
Statistics				Tests					
Variable	N	StDev	Variance	Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value	
BASELINE	45	0.098	0.010	F Test (normal)	44	44	3.67	0.000	
MENOR VELOCIDAD	45	0.051	0.003	Levene's Test (any continuous)	1	88	17.91	0.000	

Figura 57. Resultado de la prueba de hipótesis para una velocidad baja (10-10.5 m/min) de la banda transportadora de la lámina de vinil después de la estación de calandro.

En suma, después de realizar las pruebas de hipótesis para cada causa potencial el líder del proyecto llenó una tabla de matriz de causa potencial (denotada como x) y sus respectivos valores de P a fin de ser presentada al equipo del proyecto y al staff gerencial de la empresa de autopartes como parte de las conclusiones de la fase de medición. En la Figura 58 se observa la matriz de x's potenciales en donde se indica que la temperatura alta de la fórmula a la descarga de la cámara de mezclado y las velocidades alta y baja de las bandas transportadoras después de la estación de calandro como variables vitales que causan la variación de espesor de la lámina de vinil.

Matriz de causas potenciales					
No.	Causas potenciales de proceso (X's)	Origen	prueba de Hipótesis empleado	Resultado (Valor P)	¿Causa vital? (Si/No)
1	Temperatura baja de la fórmula de vinil	AMEF	Two variances	0.464	No
2	Temperatura alta de la fórmula de vinil	AMEF	Two variances	0	Si
3	Uso de sistema de enfriamiento	Ishikawa	Two variances	0.195	No
4	Velocidad alta en bandas transportadoras	Ishikawa	Two variances	0.002	Si
5	Velocidad baja en bandas transportadoras	Ishikawa	Two variances	0	Si

Figura 58. Matriz de causas potenciales (x's) con los resultados de las pruebas de hipótesis.

3.5 FASE DE MEJORA.

Hasta este momento en el trabajo de investigación de esta tesis se demostró que la temperatura alta de la fórmula, así como la velocidad de las bandas transportadoras son vitales en la variación del espesor de la lámina de vinil del aislante acústico. Para poder definir la especificación óptima para esas variables vitales se procedió a realizar un análisis de diseño de experimentos para obtener el modelo matemático que relacione el espesor de la lámina de vinil y las variables vitales antes descritas.

Se definió que el diseño de experimentos constara de dos factores (temperatura de fórmula y velocidad de bandas) y se establecieron dos niveles y un punto intermedio para cada uno de ellos. Debido a que el número de factores fue muy pequeño y que la realización de las pruebas no implicó un costo alto se optó por el diseño factorial con todas las combinaciones. Se procedió a hacer una corrida controlada para cada condición del diseño de experimento posteriormente dos días después se realizó una réplica de todo el experimento, los resultados se incluyeron en la tabla del diseño factorial de Minitab® y se presentan en la Figura 59.

Worksheet 3 ***							
↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Speed	Temp	Thickness
1	1	5	1	1	9.5	170	3.22
2	2	4	1	1	12.5	170	3.34
3	3	9	1	1	9.5	190	3.38
4	4	3	1	1	12.5	190	3.10
5	5	1	1	1	9.5	170	3.21
6	6	8	1	1	12.5	170	3.31
7	7	2	1	1	9.5	190	3.39
8	8	6	1	1	12.5	190	3.12
9	9	7	0	1	11.0	180	3.33

Figura 59. Tabla de diseño factorial para las variables de temperatura de fórmula y velocidad de bandas transportadoras.

Luego se realizaron las pruebas controladas para obtener los datos para cada combinación del diseño de experimentos, mediante Minitab® los datos obtenidos se procesaron y se obtuvo el análisis del diseño propuesto desplegado en la Figura 60. Como se aprecia para el efecto de la variable velocidad de banda, así como la interacción entre la temperatura de la fórmula y la velocidad de las bandas se identificó un valor de P menor a 0.05 por lo que se incluyeron en el modelo matemático, para el caso de la temperatura de la fórmula aunque el valor de P obtenido para su efecto fue de 0.081 no se descartó del modelo matemático puesto que está incluido en la interacción con la velocidad de las bandas. El valor P que se obtuvo para la curvatura indicó que no se puede considerar un modelo lineal para la relación entre el espesor de las láminas y las variables estudiadas por lo que se procedió a realizar un análisis de regresión.

Factorial Fit: Thickness versus Speed, Temp

Estimated Effects and Coefficients for Thickness (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3.25875	0.004841	673.12	0.000
Speed	-0.08250	-0.04125	0.004841	-8.52	0.001
Temp	-0.02250	-0.01125	0.004841	-2.32	0.081
Speed*Temp	-0.19250	-0.09625	0.004841	-19.88	0.000
Ct Pt		0.07125	0.014524	4.91	0.008

S = 0.0136931 PRESS = 0.00963061
R-Sq = 99.20% R-Sq(pred) = 89.75% R-Sq(adj) = 98.40%

Analysis of Variance for Thickness (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	0.0146250	0.0146250	0.0073125	39.00	0.002
Speed	1	0.0136125	0.0136125	0.0136125	72.60	0.001
Temp	1	0.0010125	0.0010125	0.0010125	5.40	0.081
2-Way Interactions	1	0.0741125	0.0741125	0.0741125	395.27	0.000
Speed*Temp	1	0.0741125	0.0741125	0.0741125	395.27	0.000
Curvature	1	0.0045125	0.0045125	0.0045125	24.07	0.008
Residual Error	4	0.0007500	0.0007500	0.0001875		
Pure Error	4	0.0007500	0.0007500	0.0001875		
Total	8	0.0940000				

Figura 60. Tabla de resultados del análisis del diseño de experimentos propuesto.

Por lo que se refiere al análisis de regresión se tomaron datos de espesor de lámina de vinil ajustando los parámetros en los rangos de 9.5 a 13 m/min para la velocidad de las bandas transportadoras y de 170 a 190 grados centígrados para la temperatura de la fórmula; los respectivos valores para el espesor se incluyeron en la hoja de cálculo de Minitab® y se analizó el coeficiente de determinación R hasta obtener un valor mayor al 90%, el cual se obtuvo con los factores temperatura, velocidad, el efecto combinado temperatura*velocidad y la velocidad². La Figura 61 muestra los resultados que se obtuvieron del análisis de regresión en donde se pueden apreciar los coeficientes del modelo matemático de segundo orden en la columna “Coef”. El modelo obtenido fue:

$$\text{Espesor} = 372 - 3.13 \text{ Temp} - 19.9 \text{ Vel} + 0.314 \text{ Temp} * \text{Vel} - 1.72 \text{ Vel}^2$$

Regression Analysis: Espesor versus Temperatura, Velocidad, ...

The regression equation is

$$\text{Espesor} = 372 - 3.13 \text{ Temperatura} - 19.9 \text{ Velocidad} + 0.314 \text{ Temp*Vel} - 1.72 \text{ Vel}^2$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	371.8	141.3	2.63	0.020
Temperatura	-3.126	1.178	-2.65	0.019
Velocidad	-19.904	8.195	-2.43	0.029
Temp*Vel	0.3142	0.1204	2.61	0.021
Vel^2	-1.7227	0.6400	-2.69	0.018

S = 0.0170618 R-Sq = 91.6% R-Sq(adj) = 89.3%

PRESS = 0.00882260 R-Sq(pred) = 81.91%

Figura 61. Análisis de regresión en Minitab® para el espesor de las láminas de vinil respecto de las variables temperatura de fórmula y velocidad de bandas transportadoras.

A continuación, se procedió a la determinación de los rangos o especificación óptima en la que se deben manejar las variables vitales de temperatura de fórmula y velocidad de bandas transportadoras con el fin de reducir la variación del espesor de las láminas de vinil para aislante acústico. El modelo matemático que se definió mediante regresión fue considerado para la gráfica de contorno obtenida en Minitab®. La figura 62 muestra la gráfica de contorno en donde el color más oscuro representa el rango de valores de las variables vitales para obtener un espesor igual al valor nominal de 3.30 mm de la especificación. Se pudo observar que el área limitada por el cuadro rojo indica la especificación óptima de temperatura de fórmula que va de 175 a 185 grados centígrados y de velocidad de las bandas transportadoras en un rango de 10-11.5 m/min.

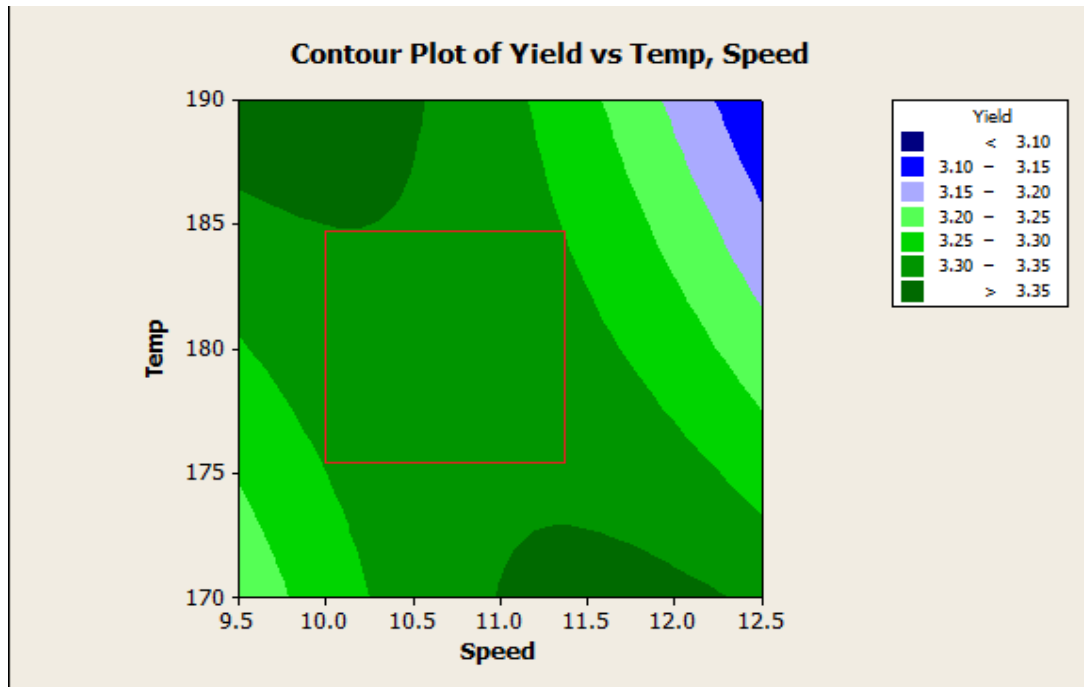


Figura 62. Gráfica de contorno para el modelo matemático $\text{Espesor} = 372 - 3.13 \text{ Temp} - 19.9 \text{ Vel} + 0.314 \text{ Temp} * \text{Vel} - 1.72 \text{ Vel}^2$

Con el rango de datos obtenidos se solicitó al Ingeniero de materiales y proceso su inclusión durante 2 meses en la hoja de parámetros de proceso para la estación de calandreo. A fin de realizar un monitoreo adecuado de la velocidad de las bandas se implementó un panel con el cual, mediante un display, se muestra la velocidad de las bandas de transporte, como se puede observar en la Figura 63 a). Para el caso de la temperatura de la fórmula se incluyó un sensor de temperatura mostrado en la Figura 63 b) para que el operador pudiera observar la temperatura de la fórmula en la estación de calandreo y en su caso pudiera segregar cualquier material que no cumpla con la especificación de 175 a 185 grados centígrados.



a)



b)

Figura 63. a) Panel con displays para observar la velocidad de las bandas transportadoras. b) Display donde se muestra la lectura de temperatura de la fórmula de vinil en la estación de calandreo.

Durante 8 semanas se mantuvieron condiciones controladas bajos los rangos que se obtuvieron del análisis de superficie de respuesta (temperatura de fórmula 175-185 grados centígrados, velocidad de las bandas transportadoras de 10-11.5 m/min), el departamento de calidad recolectó 16 datos por turno de producción de manera aleatoria, el registro de los mismos fue entregado al líder del proyecto para obtener una nueva capacidad de proceso, se pudo constatar una reducción de DPMO's del 73% desde 61,728 hasta 16,304, y como se observa en la Figura 64 el índice Z que se obtuvo fue de 3.637. Asimismo, con los datos obtenidos de la producción controlada se obtuvo el análisis de capacidad de proceso, se observa una mejora en el Pp de 0.67 a 0.81, Figura 65.

Units	Opportunities per Unit	Defects	Z-Shift	<i>(Leave blank for 90/50 Rule)</i>		Units	Defects
162	1	10	1.5	Goal	Stretch	1,288	21

Baseline Capability and Goals:

	DPU	DPMO	Z _{BL}	Z _{ST}	Y _{ST}
Baseline:	0.0617	61,728	1.540	3.040	0.940
Goal: 50% Reduction in DPMO (90/50 Rule)	0.0309	30,864	1.868	3.368	0.970
Stretch Goal: Additional 50% Reduction in DPMO (90/50 Rule)	0.0154	15,432	2.153	3.653	0.985
Final: Goal Achieved	0.0163	16,304	2.137	3.637	0.984

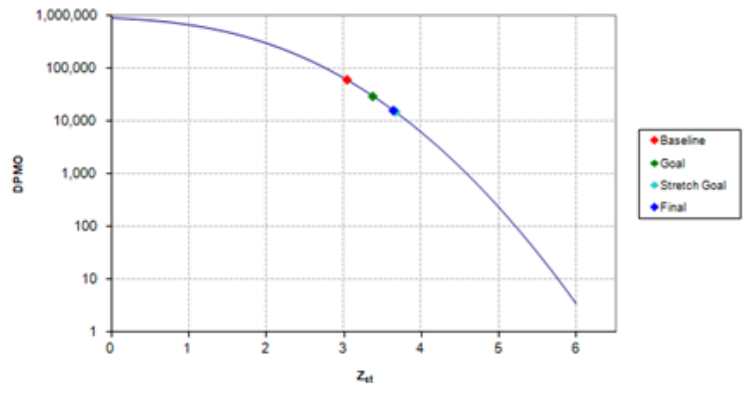


Figura 64. Cálculo del índice Z con los datos obtenidos con la nueva especificación en los parámetros de Temperatura de la fórmula y velocidad de la línea.

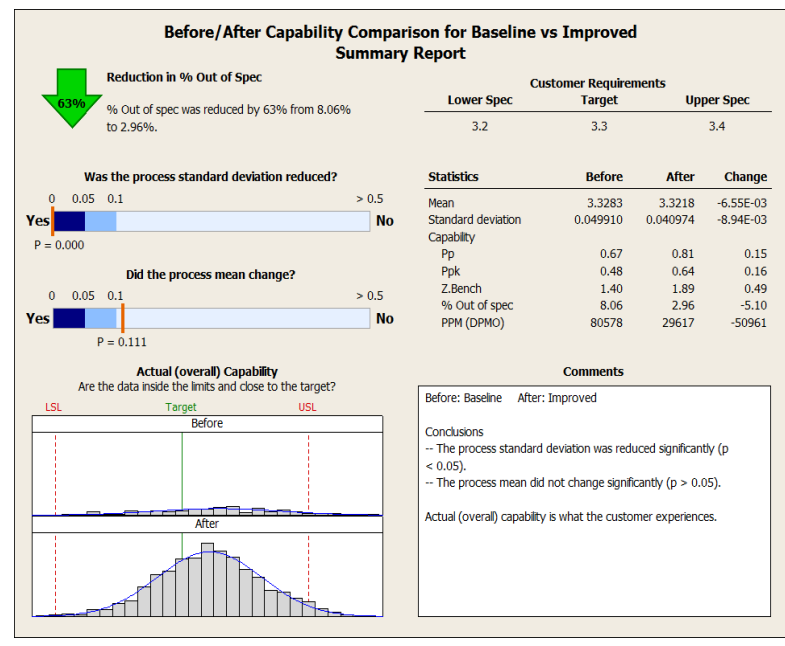


Figura 65. Gráfica de comparativa capacidad de proceso con los datos obtenidos con la nueva especificación.

Para documentar y mantener las mejoras con la especificación propuesta obtenida del análisis estadístico se actualizaron en la hoja de parámetros de proceso (Figura 66), la hoja de

Monitoreo de proceso (Figura 67), y se actualizó también la AMEF de Proceso y el Plan de Control con los nuevos parámetros.

FORMULA Y ESPECIFICACION PROCESO : VINIL GM (Alterna 23 en QAD)						
Aplica :	No. de Parte del Cliente: MP 200148	Parte afectada : VINIL K2XX	Razon de cambio :	Incremento % de Granulado, Racionalizacion Tipos de PVC nivelada de acuerdo a disponibilidad actual de PVC Scrap IAC.		
Fecha de Revisión :	Feb. 2016					
Formulación			Instrucciones de proceso de Mezclado y Calandrado:			
No. de parte	Description	Especificación (Kg)	Min.	Max.		
1			4			
1			{			
1						
1			4			
1						
2						
1						
TOTAL		383				
Instrucciones de Pesado						
1.- Al pesar PVC scrap y/o granulado retirar partículas contaminantes visibles.						
2.- Recoger el material que cae en la charola debajo de la banda de pesado y adicionarlo rapidamente al batch correspondiente (es el completo de la pesada) antes de bajar martinete para que se mezcle bien y no se retrase el ciclo.						
Parámetros		Especificación				
Presión Martinete		20 - 25 Psi				
Temperatura de Camara		INYECCION DE VAPOR 120°C. mínimo (PLC o Gráfica)				
Secuencia de Carga		0' 00" GRANULADO,				
		0' 15" BARITA, CALCIO,				
		0' 30" PVC SCRAP Cryogenics, Plasticos G y PVC IACNA (Hilo ó Drysol)				
Subir y baja martinete		1' 30" (90 seg) Subir martinete, barrer todo el calcio y barita, Bajar Martinete				
		3' 00" (180 seg) Subir y Bajar Martinete				
Temperatura Descarga		175 - 180°C Set Point 175 - 185 °C.(PLC o Gráfica)				
Ciclo Mezclado		250 - 350 (Referencial)				
Temperatura Rodillos Molino		Frontal : 160 - 175°C				
		Trasero : 140°C. mínimo				
Temperatura mezcla en el molino		180 - 190°C				
Proceso en molino :		Para homogeneizar la mezcla al descargar el batch sobre mill embande y molinee haciendo rollos.				
Temperatura Rodillos Ajustar Espesor con Rodillos 2 y 3		R1	R 1	150 - 160°C	R 3	155 - 175°C
		R2	R 2	150 - 160°C	R4	145 - 155°C
Velocidad linea (mts./ minuto)		K2 XX : 10-11.5 m/min				
Bandas de enfriamiento		Banda 1 con agua en tina, Banda 2 ventiladores				
Sistema agua enfriamiento (Registrar en QFM 660 en area de comentarios)		Chiller: 5 - 11°C	Agua Fria (retorno): 20 - 25°C.	Temperatura agua caliente 30 - 40°C.		

Figura 66. Hoja de parámetros de proceso actualizada con los parámetros propuestos Temperatura 175-185 grados centígrados y Velocidad: 10-11.3 m/min.

Monitoreo Proceso Banbury - Calender														
TURNO :			REPORTADO POR :											
FECHA :			FORMULA :											
PREPARATIVOS DE ARRANQUE DE CORRIDA MILL Y CALENDER														
1.- Limpieza :			2.- Funcionamiento Equipos:				3.- Servicios							
Camara Mezclado y conveyor pesado			Martinete				Lubricacion Sellos							
Compuerta de Recibo Mill			Sensor Temperatura Camara				Caldera Prendida							
Charola y Area Mill			Cuchillas mill				Vapor en Camara (PVC,EVA, EPDM,Woodstock)							
Banda de alimentación			Apertura/Cierre Rod. Mill				Agua Fria en Camara de Mezclado (Hules)							
Rodillos y Chumaceras mill			Banda Alimentacion Mill- Calender				Vapor en Rod. Calender / Agua Fria (Hules)							
Area Alrededor Mill libre agua			Bigoteras				Sistema Agua enfriamiento Calender							
Rodillos y Chumaceras Calender			Zero Clearance y Ajustador Calender				Extractor de Polvos							
Bandas y Area Calender			Cuchillas Calender				Básculas B-1 B2 B3 B4 B5 B Conveyor							
MEZCLADO (OP. BBY)					Calandrado				Temperaturas Sistema Enfriamiento °C					
No. BATCH	Tiempo Mezclado (seg.)	TEMP. DESC. °C		TEMP. °C. ROD. MIL		Velocidad Linea (M/ minuto)	Zero Clearance Presion (Psi)	Temperatura de Rodillos Calender °C.				Temperaturas Sistema Enfriamiento °C		
		Set point	PLC/Gráfica	FRONTAL	TRASERO			R 1	R 2	R 3	R4	Chiller	Agua Fria (Retorno)	Agua Caliente (Salida)
Especificación		175-180 °C	175-185 °C	160-175 °C	140 °C. min	10-11.5 m/min		150-160 °C	150-160 °C	155-175 °C	145-155 °C			
Arranque														
2														
3														
4														
5														

Figura 67. Hoja de Monitoreo de proceso actualizada con los parámetros propuestos Temperatura 175-185 grados centígrados y Velocidad: 10-11.3 m/min.

En la Figura 68 se muestra la carta de control para el porcentaje de defectos a lo largo de la corrida controlada usando la especificación obtenida con el análisis estadístico, como se aprecia el porcentaje de rechazos promedio 1.628%. La distribución de los datos de forma aleatoria permitió concluir que no hay causas especiales (o ajenas al proceso) que contribuyan a la generación de esos rechazos con lo cual se demuestra que la mejora se sostuvo.

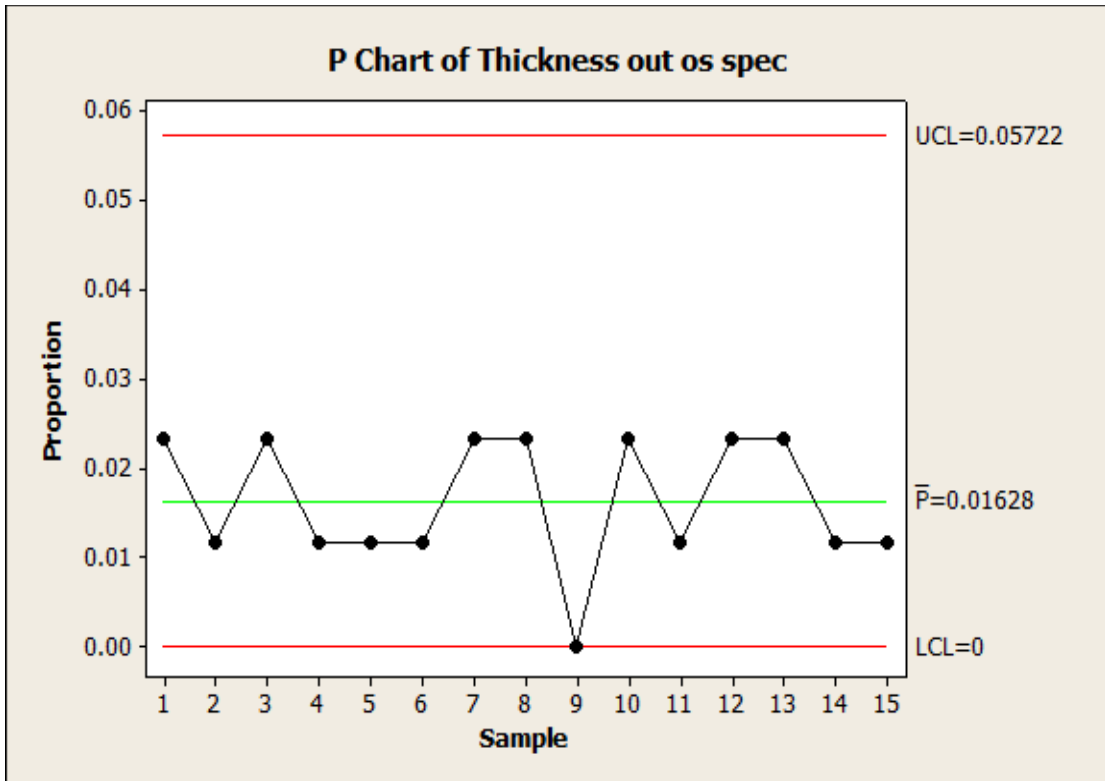


Figura 68. Carta de control para el porcentaje de defectos usando los parámetros de proceso obtenidos mediante el análisis estadístico.

SINTESIS.

Al aplicar la metodología six sigma para la reducción de variación del espesor de la lámina de vinil para aislante acústico se pudieron constatar los siguientes resultados:

- 1) El método de medición propuesto usando el micrómetro manual marca Mitutoyo® y delimitando el área a medir demostró ser confiable con un porcentaje de variación total de 5.28%, por lo cual este método fue incluido en la Hoja de Instrucción de Inspección que se usa en la empresa de autopartes para que quede documentado y estandarizado.
- 2) Con base en los resultados de la prueba de hipótesis para datos obtenidos en distintos turnos, días y semanas se concluyó que no existen causas especiales en la variación de espesor en las láminas de vinil.
- 3) Mediante el análisis del diagrama de Ishikawa y el Análisis del Modo y Efecto de falla (AMEF) de proceso por parte de un equipo multidisciplinario se identificaron diez causas potenciales en el proceso para la variación del espesor en las láminas de vinil, se realizó un análisis de matriz de causa y efecto para ponderar las diez causas potenciales y se eligieron las cuatro con mayor calificación que implican los parámetros de proceso de velocidad de las bandas de transporte, la temperatura de la fórmula de vinil y el uso de un sistema de enfriamiento en las láminas de vinil mediante esparado de agua.
- 4) Se aplicó pruebas de Hipótesis y con el resultado obtenido se concluyó que la velocidad de la banda de transporte de la lámina y la temperatura de la fórmula de vinil son estadísticamente significativas para la variación de espesor de las láminas de vinil.
- 5) Al aplicar un diseño de experimentos para tres niveles y los factores (velocidad de banda y temperatura de fórmula de vinil) se obtuvo que la interacción entre ambos factores es significativa para el espesor de las láminas y que la relación entre ellos y el espesor tiene un comportamiento cuadrático.

- 6) Para obtener el modelo matemático que relacione el espesor con los factores velocidad de banda y temperatura de fórmula de vinil se aplicó el método de regresión obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\text{Espesor} = 372 - 3.13 \text{ Temp} - 19.9 \text{ vel} + 0.314(\text{Temp} * \text{Vel}) - 1.72\text{Vel}^2$$

- 7) La ecuación obtenida fue analizada mediante el método de superficie de respuesta para obtener un espesor igual al valor nominal de 3.3 mm obteniéndose los siguientes rangos para cada factor Velocidad de Banda de 10 a 11.5 m/min y Temperatura de la Fórmula de Vinil de 175 a 185 grados centígrados.
- 8) Con los rangos de propuestos para los 2 factores se estableció una corrida controlada durante ocho semanas y el resultado fue la reducción en un 73% el número de piezas con espesor fuera de la especificación de producto esto representa cerca de 10,000 láminas al año que no se reprocesarán implicando un ahorro por uso de energía eléctrica y mano de obra.
- 9) Los rangos propuestos para la velocidad de la banda y la temperatura de la fórmula fueron incluidos en las hojas de parámetros de proceso, así como en los formatos de monitoreo de proceso para asegurar su uso en la línea de producción.
- 10) Trimestralmente en la Junta de Revisión de proyectos six sigma de la empresa de autopartes se reporta el monitoreo de porcentaje de rechazo de láminas de vinil para aislante acústico por espesor fuera de especificación para comprobar que la mejora sea sostenida.

CONCLUSIONES RESPECTO A LAS FASES DE SIX SIGMA.

De los resultados obtenidos en el presente trabajo, se presentan las conclusiones obtenidas atendiendo a la fase en la cual se generaron.

FASE DE MEDICIÓN.

Analizando el reporte de los indicadores claves de la planta de autopartes se identificó que el rechazo de la lámina de vinil por espesor fuera de especificación representa un gasto para la empresa de 69,491 dólares anuales en energía eléctrica y mano de obra para el reproceso del material. El análisis de los criterios de selección de proyectos six sigma definidos por el corporativo de la empresa de autopartes permitió concluir que la variación del espesor de las láminas de vinil se puede reducir utilizando la metodología six sigma.

Con los datos tomados para el espesor de la lámina de vinil el valor obtenido de 3.040 para el factor Z permitió definir un objetivo de reducción de defectos por millón de oportunidades igual al 50% considerando regla 90/50.

FASE DE ANALISIS.

Realizando mediciones de espesor en diferentes turnos y días se pudo observar con el resultado de las pruebas de hipótesis para las familias de variación que no hay causas especiales de temporalidad que determinen la variación de espesor en las láminas de vinil por lo cual se concluye que las causas potenciales de variación en el espesor de las láminas de vinil se pueden atribuir a las variables de proceso.

Mediante las pruebas de hipótesis se determinaron dos variables vitales para la variación del espesor de la lámina de vinil, siendo tales variables vitales la velocidad de las bandas transportadoras y la temperatura de la fórmula.

FASE DE MEJORA.

Utilizando un diseño de experimentos factorial se obtuvieron dos conclusiones: la primera es que la correlación de temperatura y velocidad es significativa para definir el modelo matemático que relacione el espesor en función de las variables vitales propuestas; la segunda conclusión, del valor de P para la curvatura se pudo deducir que se requiere una ecuación no lineal para modelar la relación entre el espesor con las variables vitales definidas.

A partir del análisis de regresión y la aplicación de la superficie de contorno la especificación propuesta fue para la velocidad de las bandas transportadoras en el rango de 10 m/min-11.5 m/min y de temperatura de fórmula de vinil en el rango de 175 C- 185 C. La aplicación de esta especificación propuesta permitió reducir los defectos por millón de oportunidades para el espesor fuera de especificación en un 75%. Eso demuestra la importancia del monitoreo de estas variables que anteriormente habían sido definidas de forma empírica considerando la experiencia de la producción del programa anterior para aislantes acústicos. La reducción de los defectos por millón de oportunidades representa un total anualizado de 128 toneladas de fórmula de vinil cuyo costo de reproceso representa 33,280 dólares anuales.

CONCLUSIONES GENERALES.

En el marco de los resultados del proyecto se pudo comprobar que los parámetros de velocidad de las bandas transportadoras y la temperatura de la fórmula de vinil influyen directamente en el espesor de la lámina de vinil para aislante acústico. La definición inicial de estos parámetros se derivó de la experiencia del programa anterior que implicaba un espesor (2.8 mm) muy diferente al producido actualmente (3.3 mm). El staff de la empresa de autopartes incluyó en su matriz de liberación de productos nuevos para el caso de las láminas de vinil y hule el estudio estadístico de capacidad de proceso para las dimensiones de estas. Igualmente, se concluyó la instalación de dispositivos que midan y desplieguen de forma visual el valor de los parámetros definidos; para el caso de la velocidad de las bandas transportadores se instaló un medidor de voltaje de los motores y mediante un software se hizo la correlación entre el voltaje medido con la velocidad de la banda cuyo valor numérico es mostrado en un display. Para el caso

de la temperatura de la fórmula se implementó un sensor de temperatura y un display que muestra el valor de la temperatura de la fórmula de vinil. El staff de la empresa de autopartes ha puesto especial hincapié en la implementación de dispositivos que ayuden al operador a monitorear más efectivamente los parámetros de proceso de forma general en las líneas de producción.

Finalmente, se definió la necesidad de replicar el estudio realizado en este proyecto también para las láminas producidas en la misma línea, pero de diferente material al vinil, en este caso de hule.

PERSPECTIVAS.

Durante la presentación del proyecto al staff gerencial de la planta de autopartes y al master black belt se recalcó la importancia de continuar con el uso del display de velocidades para la visualización de los valores de velocidad de las bandas transportadoras del material por parte del operador a modo de que se continúen haciendo los ajustes necesarios durante la producción. En función de los resultados obtenidos durante las ocho semanas en las cuales se corrió la producción con la especificación propuesta, el gerente de mantenimiento solicitará un proyecto de inversión para implementar un sistema de ajuste de velocidades que mantenga la sincronía de la velocidad de las estaciones en las cuales el material hace su recorrido y que de esta forma el ajuste de velocidades llegue a realizarse con un sistema automático y no manual.

RECOMENDACIONES.

Se recomendó al staff gerencial de la planta de autopartes replicar el estudio del efecto de velocidades de las distintas estaciones de la línea en la cual se transporta el material laminado para el producto de hule puesto que se reportó el defecto de láminas con corte sesgado lo cual ha implicado producir la lámina sobrepasando la especificación superior para la dimensión de largo a modo de evitar rechazo del cliente por lámina corta, dentro del análisis de contención que realizó el departamento de calidad se reportó como una causa probable de ese defecto el acumulamiento y estiramiento de material debido a diferencias en las velocidades entre las bandas transportadoras y los rodillos de enfriamiento.

Anexo.

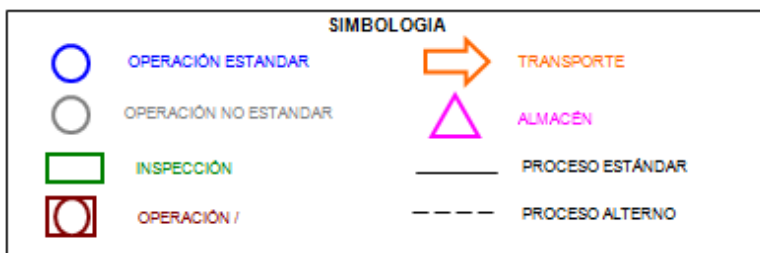
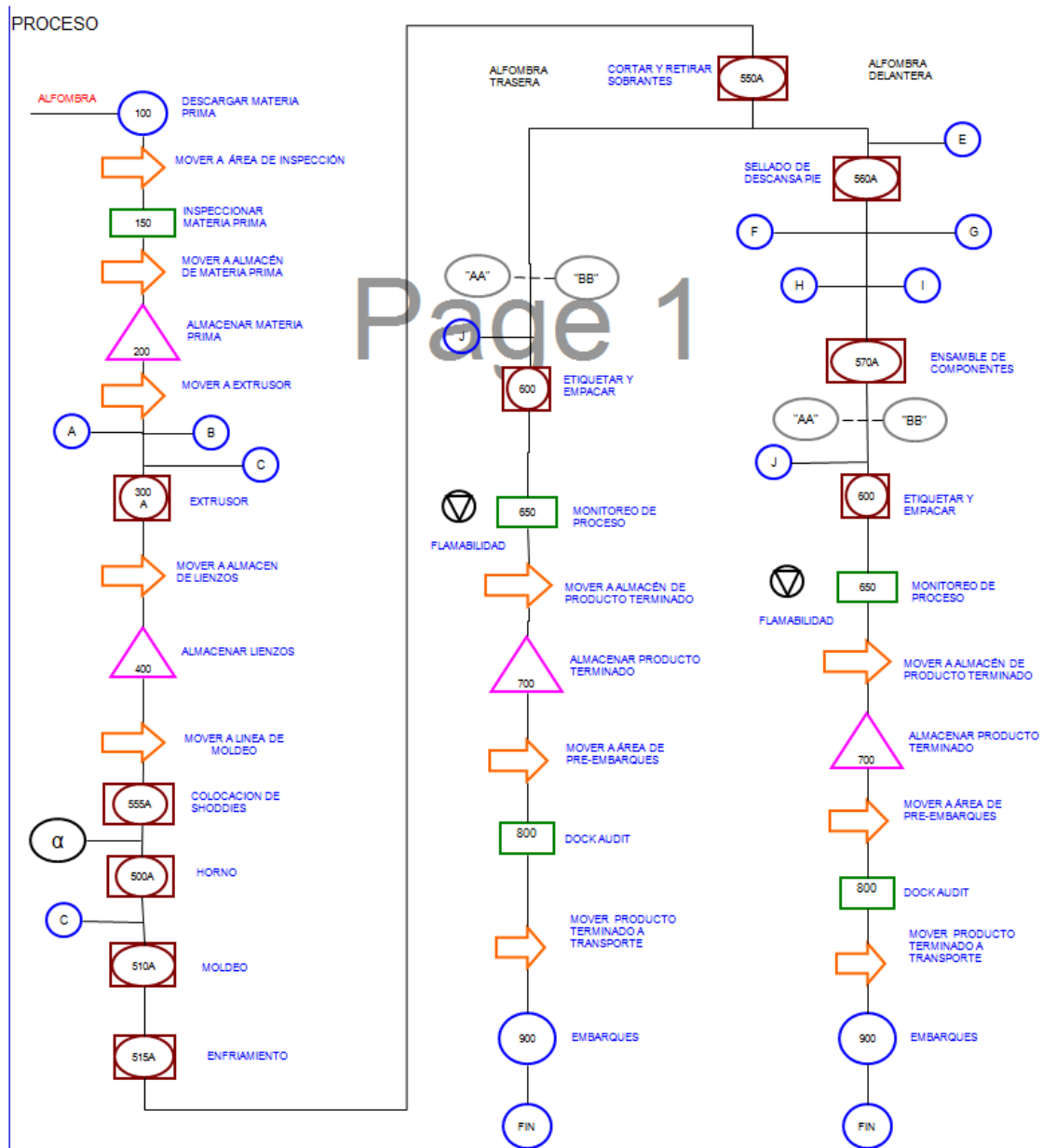
- Tabla 1: Factores para la construcción de las cartas de control.

FACTORES PARA LA CONSTRUCCION DE LA CARTA DE CONTROL.						
Tamaño de la muestra	Carta \bar{X}	Carta R			Carta S	Estimación de σ
n	A_2	d_3	D_3	D_4	c_4	d_2
2	1.880	0.853	0.0000	3.2686	0.7979	1.128
3	1.023	0.888	0.0000	2.5735	0.8862	1.693
4	0.729	0.880	0.0000	2.2822	0.9213	2.059
5	0.577	0.864	0.0000	2.1144	0.9400	2.326
6	0.483	0.848	0.0000	2.0039	0.9515	2.534
7	0.419	0.833	0.0758	1.9242	0.9594	2.704
8	0.373	0.820	0.1359	1.8641	0.9560	2.847
9	0.337	0.808	0.1838	1.8162	0.9693	2.970
10	0.308	0.797	0.2232	1.7768	0.9727	3.078
11	0.285	0.787	0.2559	1.7441	0.9754	3.173
12	0.266	0.778	0.2836	1.7164	0.9776	3.258
13	0.249	0.770	0.3076	1.6924	0.9794	3.336
14	0.235	0.763	0.3281	1.6719	0.9810	3.407
15	0.223	0.756	0.3468	1.6532	0.9823	3.472

- Tabla 2. Puntos Críticos de la distribución normal estándar.

z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	0.5	0.496	0.492	0.488	0.484	0.48	0.476	0.472	0.468	0.464
0.1	0.46	0.456	0.452	0.448	0.444	0.44	0.436	0.433	0.429	0.425
0.2	0.421	0.417	0.413	0.409	0.405	0.401	0.397	0.394	0.39	0.386
0.3	0.382	0.378	0.374	0.371	0.367	0.363	0.359	0.356	0.352	0.348
0.4	0.345	0.341	0.337	0.334	0.33	0.326	0.323	0.319	0.316	0.312
0.5	0.309	0.305	0.302	0.298	0.295	0.291	0.288	0.284	0.281	0.278
0.6	0.274	0.271	0.268	0.264	0.261	0.258	0.255	0.251	0.248	0.245
0.7	0.242	0.239	0.236	0.233	0.23	0.227	0.224	0.221	0.218	0.215
0.8	0.212	0.209	0.206	0.203	0.2	0.198	0.195	0.192	0.189	0.187
0.9	0.184	0.181	0.179	0.176	0.174	0.171	0.169	0.166	0.164	0.161
1	0.159	0.156	0.154	0.152	0.149	0.147	0.145	0.142	0.14	0.138
1.1	0.136	0.133	0.131	0.129	0.127	0.125	0.123	0.121	0.119	0.117
1.2	0.115	0.113	0.111	0.109	0.107	0.106	0.104	0.102	0.1	0.099
1.3	0.097	0.095	0.093	0.092	0.09	0.089	0.087	0.085	0.084	0.082
1.4	0.081	0.079	0.078	0.076	0.075	0.074	0.072	0.071	0.069	0.068
1.5	0.067	0.066	0.064	0.063	0.062	0.061	0.059	0.058	0.057	0.056
1.6	0.055	0.054	0.053	0.052	0.05	0.049	0.048	0.047	0.046	0.046
1.7	0.045	0.044	0.043	0.042	0.041	0.04	0.039	0.038	0.038	0.037
1.8	0.036	0.035	0.034	0.034	0.033	0.032	0.031	0.031	0.03	0.029
1.9	0.029	0.028	0.027	0.027	0.026	0.026	0.025	0.024	0.024	0.023
2	0.023	0.022	0.022	0.021	0.021	0.02	0.02	0.019	0.019	0.018
2.1	0.018	0.017	0.017	0.017	0.016	0.016	0.015	0.015	0.015	0.014
2.2	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011
2.3	0.011	0.01	0.01	0.01	0.01	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008
2.4	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006
2.5	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
2.6	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
2.7	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
2.8	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
2.9	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
3	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
3.1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
3.2	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0
3.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- Tabla 3. Ejemplo de diagrama de flujo usando la simbología ANSI. (pag 42)



Referencias.

- AIAG. (2008). Potential Failure Mode and Effect Analysis. *Automotive Industry Action Group*.
- Allen, T. (2006). Introduction to engineering statistic and Six Sigma. *Springer*, 19-255.
- Alvarez, L. (2000). Design Optimization based on Genetic Programming. *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bradford, UK.*, 132.
- Bender. (2000). *An Introduction to Mathematical Modeling*. New York: Dover.
- Bidanda, B. M. (2008). Levering Six Sigma with industrial engineering tools in crateless retort production. *Int. J Prod Res*, 6701-6719.
- Borrow, C. (2009). *The Certified Quality Engineer Handbook*. ASQ Quality Press.
- Brue, G. (2006). *Six Sigma for Small Business*. Madison, Wisconsin.: Entrepreneur Press.
- Carmell, M. (2003). Gathering customer feedback. *Quality Progress*, 60-61.
- Gijo EV, S. J. (2010). Reducing rejection and rework by application of Six Sigma methodology in manufacturing process. *Int J Six Sigma and Competitive Advantages 6 (1/2)*, 77-90.
- Gijo, S. J. (2013). Process Improvement trough Six Sigma with Beta Correction: a case of study in manufacturing company. *Int J Adv Manufacturing Technology*, 717-730.
- Glantz, S. (1990). *Primer of Applied Regression and Analysis of Variance*. New York: Mc Graw Hill.
- Gryna, F. C. (2007). *Quality Planning & Analysis for Enterprise Quality, 5th edn*. New Delhi: Tata Mc Graw Hill.
- Gutiérrez, P. H. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos 3a Ed*. México D.F.: Mc Graw Hill.

Henderson KM, E. J. (2000). Successful implementation of Six Sigma: benchmarking General Electric Company. *Benchmarking An Int* , 260-281.

Hoerl, R. W. (2004). One perspective of the future of six sigma. *Int J Six Sigma Competitive Advantage* , 112-119.

Ishikawa K, L. D. (1985). *What is total quality control? The japanese way*. New Jersey: Prentice Hall.

Kachingan, K. (1986). *Statistical Analysis*. New York: Radius Press.

Kubiak, T. B. (2010). *The Certified Six Sigma Black Belt Handbook, 2 nd edn.* . New Delhi: Dorling Kindersley Pvt Ltd.

Kubiak, T. B. (2010). *The Certified Six Sigma Black Belt Handbook*. India: Dorling Kinderley Pvt Ltd.

Kubiak, T. (2010). *The Certified Six Sigma Black Handbook*. New Dheli: Dorling Kindersley Pvt Ltd.

Kuehn, H. E. (1965). *Patent No. US3191263 A*. United States.

Linderman, S. R. (2003). Six Sigma. *Journal of operation management* , 193-203.

Lopez, P. (2005). *Muestreo estadístico: conceptos y problemas resueltos*. Madrid: Pearson Prentice Hall.

Macadam, J. (1907). *Patent No. US907829 A*. United States.

Mahesh S. Rasinghani, E. H. (2005). Six Sigma: Concepts, Tools and applications. *Inudstrial management and data systems* , 491-501.

Mc Clusky, R. (2000). Measuring Business Excellence. *The journal of business performance measurament* , 209-211.

Montgomery. (2009). *Design and Analysis of Experiments*. New Dheli: Wiley.

Montgomery. (2003). *Introduction to Statistical Quality*. India.

Muralidharan, K. S. (2012). *Statistical Methods for Quality, Reability and maintainability*. New Delhi: PHI.

Oehklert, G. (2000). *Design and analysis of experiments: Response surface design*. W.H. Freeman and Company: New York:.

Osborn, A. (1963). *Applied Imagination: Principles and Procedures of creative problem solving*. New York: Charles Scribner's Sons.

Pande, P. N. (2003). *The Six Sigma way*. New Dheli: Tata Mc Graw Hill.

Pandey, A. (2006). Strategically focused training in six sigma way: a case study. *Emerald Insight* , 152-153.

Parekh. (1999). *Patent No. 5922265*. United States.

Pulido, H. G. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*. México DF: Mc Graw Hill.

Pyzdek, A. K. (2010). *The Six Sigma Handbook*. New York: Mc Graw Hill.

RW, H. (2001). Six Sigma Black Belts what they need to know? *J Qual Technol* , 391-406.

Schoerer, H. (1999). *Six Sigma: The breakthrough management strategy revolutionizing the world's top coprporation*. New York: Double Day.

Simpson, W. G. (1995). *Plastic: Surface and Finish*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.

Six Sigma. (2015, May 15). Retrieved from Six Sigma.com: <http://www.sixsigma.com/tools-templates/project-charter/six-sigma-project-charter/>

Six Sigma Institute. (2015, May 15). Retrieved from Six Sigma Institute web site: (7)
http://www.sixsigmainstitute.org/Six_Sigma_DMAIC_Process_Define_Phase_Capturing_Voice_Of_Customer_VOC.php

Spiegel. (2007). *Probabilidad y Estadística (Schaum's Outline of Theory and Problems of Probability and Statistics)*. México D.F: Mc Graw Hill.

Tsung, F. (2006). Six Sigma. *Springer Handbook of Engineering Statistics* , 961.

White, J. (1990). *Principles of Polymer Engineering Rheology*. New York: Wiley Interscience.