

Reducción y control de costos en empresa de manufactura con Seis Sigma (Reduction and control of costs in manufacturing company with Six Sigma)

Juan Baldemar Garza Villegas ♦
Ramiro Alfonso Abrego Traslaviña ♦

Abstract: This case study indicates how the statistics and engineering analysis Six Sigma lead us to find the root-cause operational solutions, resulting on improvement in quality and control of our processes. After defining the real root-cause problem and proving them statistically, it shows us how we can control and improve operations by eliminating waste and generating annual savings in this empirical research, reducing 40% of the use of coatings generating savings greater than \$1,000,000.00 MN.

Keywords: process entitlement, quality control, scrap, six sigma, waste

JEL: L00, M11

Resumen: Este caso de estudio indica como la estadística y el análisis ingenieril Seis Sigma nos llevan a encontrar las soluciones operativas de causa raíz, llevando a que mejoremos la calidad y control de nuestros procesos. Después de definir el verdadero problema de causa raíz y comprobarlo estadísticamente, nos muestra cómo podemos controlar y mejorar el control de las operaciones eliminando los desperdicios y generando ahorros anuales en esta investigación empírica, reduciendo el 40% de utilización de recubrimientos aplicados sobre las carcasas de metal, generando un ahorro mayor a \$1, 000,000.00 M.N. anual.

Palabras clave: control de calidad, desperdicios, muda, seis sigma, línea base

♦ Universidad de Monterrey, Av. Ignacio Morones Prieto 4500 Pte., 66238, San Pedro Garza García, N.L. México.
Email: jbg.villegas@hotmail.com

♦ Universidad de Monterrey, Av. Ignacio Morones Prieto 4500 Pte., 66238, San Pedro Garza García, N.L. México.
Email: ramiro.abrego@udem.edu

Introducción

Seis Sigma es una estrategia de negocio que busca identificar y eliminar las causas de los errores para evitar productos defectuosos. Enfocándose principalmente en la voz del cliente (Snee, 1999).

Existe un número importante de artículos de investigación, divulgación y libros que muestran los fundamentos conceptuales de Seis Sigma (Hoerl, 1998; Breyfogle III, 1999; Harry y Schroeder, 1999) otros artículos muestran el por qué necesitamos de la estrategia Seis Sigma en la empresa (Snee, 2000; Pande et al., 2001) otros más hablan de la diferencia del Seis Sigma y otras técnicas de la calidad (Pyzdek, 2014; Snee y Hoerl, 2003) sobre su despliegue e implementación (Keller, 2001; Adams et al., 2003), sobre sus factores críticos de éxito (Antony y Bañuelas, 2002) sobre su proceso de selección de proyectos (Snee, 2002) y sobre la infraestructura (Adams et al., 2003; Snee y Hoerl, 2003).

Pero existen pocos casos de estudio de investigación aplicada en México y sobre todo publicados, que permitan revisar a detalle del proceso metodológico de implementación de un proyecto Seis Sigma en la industria.

Este artículo describe un caso de estudio de las operaciones cotidianas de las empresas manufactureras donde se trabaja de una manera estable, se cumplen los requerimientos de los clientes y se goza de estabilidad económica dentro de las operaciones. Este artículo se desarrolla en la investigación empírica de optimización de recursos y mejora de estándares con la intención de obtener rentabilidad o mayor rendimiento sobre los bienes de consumo operacional. Donde la aplicación de la metodología DMAIC y el desarrollo de experimentos (DOE) combinado con las herramientas de la manufactura esbelta orientan a la operación a la optimización adecuada de recursos y eliminación de mermas de producción. Esta investigación aplicada emerge de la necesidad de la empresa por ser más competitivos en el aprovechamiento de recursos empleados a la transformación de materias primas a productos terminados, es por ello que las empresas de manufactura buscan la optimización de los costos generados en el área productiva. Al hacer el estudio matemático traducido a impactos económicos cuantitativos de cuál era generado por el desperdicio oculto dentro de la operación, se logra determinar que se puede reducir el costo en un 31.9% en los costos de materia prima aplicados directamente en las carcasas de metal por producto,

teniendo un impacto económico variable de acuerdo a los lotes de producción, sin necesidad de afectar la calidad de estos mismos.

La finalidad de este proyecto es disminuir los costos de una operación de una empresa manufacturera. Se logrará mediante el análisis estadístico Seis Sigma para determinar el control de procesos que se deben de emplear en aplicación de recubrimientos en carcasas metálicas. No solo se obtendrán beneficios económicos sino que mejorará el control operativo de las variables de intervención, así como mejorar la calidad del proceso y producto.

Marco teórico

Seis Sigma representa una métrica, desarrollada en los años de los 80's en los Estados Unidos de América. La metodología, Seis Sigma representa el control métrico de los procesos otorgando soluciones, control y objetivos alcanzables de acuerdo a las entradas de parámetros primarios y secundarios.

Para adaptar una filosofía de Seis Sigma refiere a obtener una gestión estratégica, ya que innova y otorga el mejoramiento continuo de procesos y productos. El proceso de adaptación a la metodología de Seis Sigma refiere a obtener beneficios en 3 esquemas, el operativo, el táctico y el cultural. Basado en el desarrollo de la metodología DMAIC, la cual se desarrolla desde la definición real del problema, investigación estadística de la situación y el control de las mismas para obtener beneficios a largo plazo (Evans, 2008).

Esta metodología DMAIC, desarrollada con las bases de la manufactura esbelta define como meta un nivel de control Seis Sigma, así como las metas secuenciales para que los proyectos puedan ser realizados y no solo queden plasmados en ideas en papel ya que las métricas y objetivos no sean alcanzados en primer instancia, esto refiere que estadísticamente nuestros procesos no se deben de desviar de los estándares establecidos así como establecer metas alcanzables.

Un estudio de Seis Sigma solo permitirá 3.4 defectos por millón de oportunidad (Escalante, 2008). Seis Sigma se tiene que desenvolver en las bases de la manufactura esbelta, la manufactura esbelta refiere a siete (7) tipos de mudas o desperdicios, estos se pueden presentar en cualquier proceso ya sea administrativo u operativo en el transporte, tiempos de espera, retrabajos o sobre procesamientos, movimientos que no agregan valor,

producciones innecesarias o excesivas las cuales pueden causar exceso de inventario y/o defectos los cuales son también considerados como un desperdicio de acuerdo a la manufactura esbelta. De acuerdo a Cassettari, C., Batocchio, A., and Marcondes, A., (2005) la metodología Seis Sigma y la Manufactura Esbelta permiten un poderoso enfoque para resolver desperdicios de manera práctica y usando el pensamiento estadístico. A continuación se describen de manera breve cada uno de los desperdicios de la manufactura esbelta (Womack & Jones, 1996).

1. En el transporte: El hecho de mover materiales en distancias largas o cortas, donde el producto no está siendo modificado y no adopta un valor agregado, de la misma manera es visto en los movimientos de operación realizadas por el factor humano.
2. Tiempo de espera: Cuando las materias primas se encuentran almacenadas en tiempos excesivos o cortos, así como la mano de obra en espera sin ser efectiva.
3. Retrabajos o sobre procesos: Es la ejecución de operaciones innecesarias en el producto, es decir le estamos empleando mano de obra fuera del estándar o características de las cuales le importan y son apreciadas por nuestros clientes.
4. Movimientos que no agregan valor: Esta muda radica principalmente en la operación y refiere al factor humano que realiza movimientos por no tener infraestructuras esbeltas y se encuentran con movimiento no ergonómicos, otro caso se da en la planeación del centro de trabajo, en materiales que recorren mayor distancia a las requeridas para llegar a su próxima operación.
5. Sobreproducción: Refiere a la fabricación de productos en mayor cantidad a la requerida por nuestro cliente interno cuando son procesos continuos, o externos para productos terminados de nuestros clientes.
6. Exceso de inventario: Todos los materiales que se encuentren en mayor cantidad a la requerida por la demanda, cabe mencionar que este genera costos de espacios y administración.
7. Defecto: Son todas las operaciones y productos que no están generados como lo especifica su plano o descripción, esto genera costos ocultos en mano de obra para recuperar elementos, conocidos también como fabrica oculta ya que son costos no planeados en el producto.

Lo más importante dentro de los desperdicios que identifica la manufactura esbelta, es eliminarlos o al menos controlarlos en su menor expresión dentro de alguna operación, se debe de tener en cuenta que cualquier tipo de eliminación de los procesos repercuten directamente en la disminución de costos de los productos realizados, se recomienda la concientización de todo el personal para la eliminación de desperdicios, es por eso que un cambio Seis Sigma considera los cambios culturales dentro de la organización ya que es normal que los proyectos a largo plazo presenten problemas para mantenerse, pero un cambio cultural puede asegurar la capacidad de adaptar cambios en el ambiente laboral (Meier, 2006).

Dentro de las mediciones recomendadas para la métrica de Objetivos, en los proyectos se recomienda utilizar la medición de la Línea Base, ya que permite un estudio de base es decir que será la primera medición histórica real de nuestros gastos o indicadores, para realizar el diseño de un proyecto y permite crear la plataforma o base donde se establece el “*punto de partida*” y el primer objetivo a alcanzar (Harry y Schroeder, 1999). Donde de acuerdo a la teoría de la aplicación de la línea base, para controlar las variaciones se determina la siguiente fórmula para el proyecto de estudio:

Línea Base, recomienda mejorar en al menos un 70% para de la diferencia entre lo real y el objetivo donde se analiza en este proyecto de la siguiente manera:

1. Cálculo de línea base : El promedio del espesor de pintura en los últimos 3 meses (Base a registros históricos ej. 3.8 milésimas de pulgada)
2. Objetivo: Especificación de aplicación en espesor de pintura (ej. 2.0 (+/-) .5 milésimas de pulgada)
3. Calculo de la meta de proyecto DMAIC (es el 70% de la diferencia entre la línea base y la especificación)

Línea base = 3.8 milésimas de pulgada (muestra histórica)

$(3.8 \text{ LB} - 2.0 \text{ esp}) = 1.8$ diferencia de objetivos

$1.8 * 70\% = 1.26$, el cual se debe de reducir para definir objetivos $(3.8 - 1.26 = 2.54)$

Meta de proyecto = 2.5 milésimas de pulgada. Se deberá lograr un espesor no mayor a 2.5.

Una vez definido el objetivo el método del caso de estudio fue el DMAIC el cual es un acrónimo de los pasos y se describen de la siguiente manera:

Definir: Como su nombre lo indica en esta fase del proyecto el objetivo es definir cuál es el problema donde se requiere de mejora en algún proceso.

Medir: La etapa de medición tiene el fin de definir cuál es la situación del proceso crítico que se desea analizar y mejorar, aquí es donde se debe de certificar que la medición es confiable y la capacidad del proceso en estudio.

Analizar: En esta etapa se lleva un análisis de la información para determinar las definiciones de las variables, encontrar causas raíz de los problemas así como validar cuales son las variables que afectan directamente el resultado de la constante o producto en este caso.

Mejorar: En esta etapa se desarrollan propuestas de mejora capaces de otorgar soluciones y control en las causas raíz de los problemas. En esta etapa se realizan experimentaciones y diseño de los mismos así como análisis inferenciales de los resultantes.

Controlar: Esta fase se valida los resultados del estudio, y tiene como objetivo prevenir que la solución sea temporal, se deben de documentar nuevos procesos, operaciones y controles. El objetivo es lograr que el proyecto y mejoras alcanzadas no se dejen de aplicar y decaigan en la línea del tiempo (Evans, 2008).

Metodología

Definición de proyecto del caso de estudio

El producto de estudio en este caso las carcasas metálicas pasan por procesos que modifican la materia prima. La manufactura implica desde el montaje de la materia prima en las prensas de formado, para posteriormente pasar a las líneas de ensamble para crear sub ensambles y después pasar al proceso de pintado y empaquetado y llegar a un producto terminado para nuestros clientes. El objeto de estudio caracterizado en la caseta de aplicación de pintura en polvo sobre las carcasas donde dentro de esta operación podemos encontrar variables como presiones, carga de

energías sobre las carcasas, ajuste de presión de polvo y aire que son determinantes para la cantidad de pintura aplicada en cada carcasa, así como acabados y cumplimientos de los estándares de los clientes. En busca de optimizar las operaciones de la planta se decidió mejorar y controlar el proceso de pintura en las carcasas metálicas ya que representan el 97% de nuestros productos (Tabla 1). Atacando la mayor parte productiva con el objetivo de reducir los costos de producción en los productos impactando en costo y calidad para no perder participación en el mercado global, con el cual se compete en la actualidad.

Tabla 1. *Análisis de Productos para estudio, en base a volúmenes productivos*

	PRODUCCIÓN ANUAL (PZ)	PARTICIPACION
CARCASA 156	16,456,000	38%
CARCASA 280	12,340,000	29%
CARCASA 100	9,875,000	23%
CARCASA 370	3,200,000	7%
ENSAMBLE INT. 256	720,000	2%
ENSAMBLE INT. 556	320,000	1%
ENSAMBLE INT. 756	240,000	1%
	43,151,000	100%

Fuente: Elaboración propia

Fase Definir: Problemática o definición del problema

Las carcasas metálicas llevan un recubrimiento con pintura la cual debe de cumplir con una especificación de espesor que es de 1.5 a 2.5 milésimas de pulgada, actualmente estamos aplicando mayor cantidad de pintura, lo cual da un espesor promedio de 3.8 milésimas de pulgada, esto nos indica que estamos aplicando un 90% más con respecto a la media de la especificación que es de 2.0 milésimas de pulgada, por consecuencia nuestro consumo de pintura es muy alto e incurrimos en un gasto mayor al presupuestado, incurriendo en problemas de calidad del producto, la pintura se vuelve quebradiza, no agrega valor al producto, la pintura pierde propiedades de adherencia cada vez que recircula dentro del sistema.

Una vez identificado el problema se plantean las siguientes preguntas para determinar si es candidato al análisis DMAIC:

- ¿Existe diferencia entre la situación actual y la deseada?
- ¿Conoce la raíz del problema?
- ¿Conoce la solución al problema?

Cuando algunas de estas preguntas no se conoce con asertividad la solución es candidato a un análisis DMAIC del Seis Sigma.

Definición de problema: Una vez que se determinó la respuesta a cada pregunta, se mapea el proceso para determinar la operación o estación de trabajo a analizar, haciéndonos estas preguntas para continuar con la fase de definición:

- ¿Qué es el problema? Exceso del 90% en la aplicación de pintura.
- ¿Dónde ocurre? En las líneas 1,2 y 3 de filtro sellado.
- ¿Cuándo ocurre? ¿Cuándo pasó por primera vez? Todos los días de acuerdo a registros de producción.
- ¿Qué magnitud tiene el problema? (¿Qué tanto?) Estamos consumiendo el 90 % más de pintura por unidad con respecto a lo especificado.
- ¿Cómo lo sé? Según los registros diarios de espesor de pintura de cada línea y el consumo mensual de pintura contra el presupuestado o estándar.

Enunciado del Problema: Exceso del 90% en la aplicación de pintura en carcasas metálicas en los centros operacionales 1,2 y 3, lo cual genera un mayor consumo de pintura, con un impacto económico mensual de \$ 74,078 MN en promedio de acuerdo a los reportes de espesor de pintura y consumo de pintura.

Justificación del Proyecto: Al controlar la aplicación de pintura en las carcasas metálicas significaría un decremento de costos objetivo total en términos financieros de \$888,945.27 M.N., de acuerdo a un cálculo estimado a valores reales de un bimestre productivo (véase la Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2. *Recopilación de datos para medición financiera*

MES	Obj. Pintura en Kg.	Real Pintura en Kg.	Diferencia en Kg.	Obj. Pintura en \$	Real Pintura en \$	Diferencia en \$	% De variación
SEPT	6688.24	9679.54	2991.3	\$279,167	\$404,024	\$124,857	44.7
OCT	6467.09	7926.51	1459.42	\$269,936	\$330,853	\$60,916	22.6
TOTAL	13155.33	17606.05	4450.72	549103	734876.80	185773	67.3
PROMEDIO	6623.7286	9159.11	2535.38	\$276,474	\$382,301	\$105,827	38.3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. *Resumen de consumo y cálculo de ahorro de acuerdo a línea base*

Gasto Pintura mensual Real=	382,301	= Línea base
Gasto pintura mensual Objetivo=	\$ 276,474	= Factor
Diferencia mensual=	\$ 105,827	= Gap
Meta mensual = al 70%	\$ 74,078.90	= Meta Mensual
Meta anualizada en Pesos=	\$ 888,945.27	= Meta anual.

Fuente: Elaboración propia

Métricos del estudio: Al desarrollar un estudio se deben identificar los métricos de las operaciones o acciones que se están estudiando, para determinar qué tipo de datos son, esto nos ayuda a definir qué tipo de pruebas estadísticas aplicar, en este caso se determinaron los siguientes métricos (véase tabla 4)

Tabla 4. *Métricos del estudio*

Nombre	Tipo de dato	Unidad de Medida	Método de cálculo	Descripción
Espesor de pintura	Continuo	Milésimas de pulgada	Lectura de micrómetro	Medición del espesor de pintura aplicada al filtro
Consumo de pintura	Continuo	Kilogramos	Lectura de los Kilogramos de pintura utilizados por día	Medición de la cantidad de kilogramos de pintura que se consume diariamente.

Fuente: Elaboración propia

Línea Base (Process Entitlement): Medición de desempeño inicial del proceso al iniciar el proyecto. (Gutierrez, 2009). Se muestra a detalle la obtención del objetivo. Para determinar el objetivo del proyecto.

Línea Base.

Cálculo: El promedio del espesor de pintura en los últimos 2 meses es de 3.8 milésimas de pulgada.

Línea base = 3.8 milésimas de pulgada

Especificación: La especificación es de 2.0 (+/-) .5 milésimas de pulgada, ya se ha logrado hay lecturas con estos valores y menos dentro de los rangos de la especificación.

Especificación= 2.0 milésimas de pulgada.

Meta:

Cálculo: es el 70% de la diferencia entre la línea base y el especificación
 $(3.8 - 2.0) = 1.8$ diferencia, $1.8 * 70\% = 1.26$, $3.8 - 1.26 = 2.54$

Meta = 2.5 milésimas de pulgada

Declaración de Objetivos: Disminuir el espesor de la pintura en las carcasas metálicas y pasar desde 3.8 milésimas de pulgada como valor actual, hasta 2.5 milésimas de pulgada, sujeto a que el proceso de pintura y los criterios de calidad del producto sean los mismos que el día de hoy.

Fase Medir

Es importante establecer el desempeño de las "X" o variables independientes para la relación directa de nuestra "Y" la variable dependiente. Con la finalidad de validar nuestra toma de datos se realizan pruebas con los datos recolectados de la operación para certificar la veracidad de datos. A continuación se muestra la recolección de 125 datos para realizar pruebas estadísticas en el proceso y definir si el proceso es estable. Véase Tabla 5 y Figuras 1, 2 y 3.

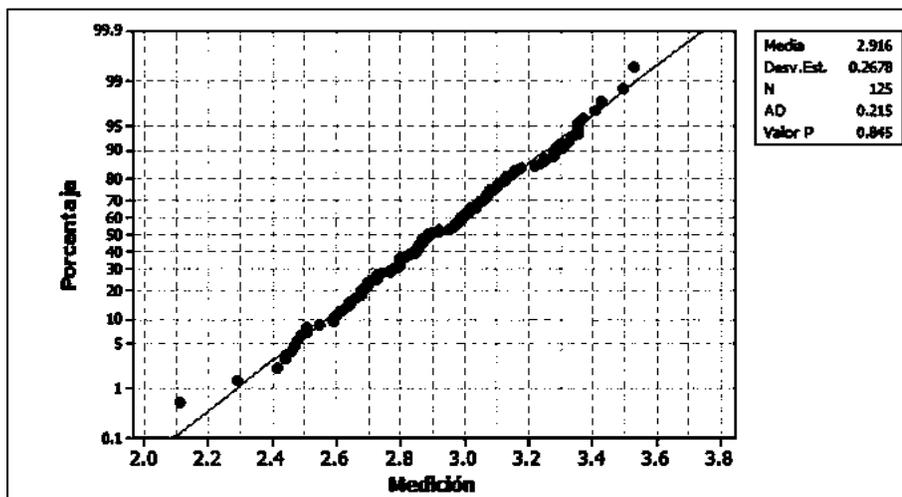
Tabla 5. *Toma de muestras*

Muestra	Medición								
1	3	26	3.36	51	2.48	76	2.98	101	2.97
2	2.8	27	2.77	52	3.53	77	3.36	102	2.8
3	3.34	28	2.51	53	3.07	78	3.18	103	2.68
4	3.25	29	2.89	54	2.73	79	2.69	104	3.31
5	3.07	30	3.25	55	3.08	80	2.99	105	3.08
6	2.11	31	2.65	56	2.86	81	3.01	106	3.1
7	2.86	32	3.06	57	2.82	82	3.37	107	2.49
8	2.74	33	2.95	58	2.61	83	2.67	108	3.07
9	2.87	34	2.71	59	2.78	84	3.22	109	2.68
10	2.59	35	3.04	60	2.85	85	3.06	110	2.85
11	3.05	36	3.16	61	3.12	86	3.33	111	3.08
12	2.99	37	3.24	62	3.28	87	2.66	112	2.42
13	3.04	38	2.69	63	2.99	88	3.43	113	2.87
14	2.8	39	3.13	64	3.15	89	2.9	114	2.7
15	2.8	40	3.11	65	2.46	90	2.68	115	2.62
16	2.88	41	3.1	66	2.86	91	2.92	116	2.92
17	2.89	42	2.64	67	2.98	92	2.73	117	2.44
18	2.87	43	2.86	68	3.02	93	2.55	118	2.64
19	2.73	44	3.04	69	2.59	94	2.79	119	2.8
20	2.8	45	2.83	70	3.28	95	3.16	120	3.05
21	3.36	46	3.31	71	2.7	96	2.47	121	2.77
22	3.29	47	2.96	72	2.87	97	2.73	122	2.29
23	3.13	48	3.02	73	2.51	98	3.5	123	3.01
24	2.85	49	3.02	74	2.89	99	2.63	124	2.8
25	3.41	50	3.13	75	2.97	100	2.99	125	2.6

Fuente: Elaboración propia

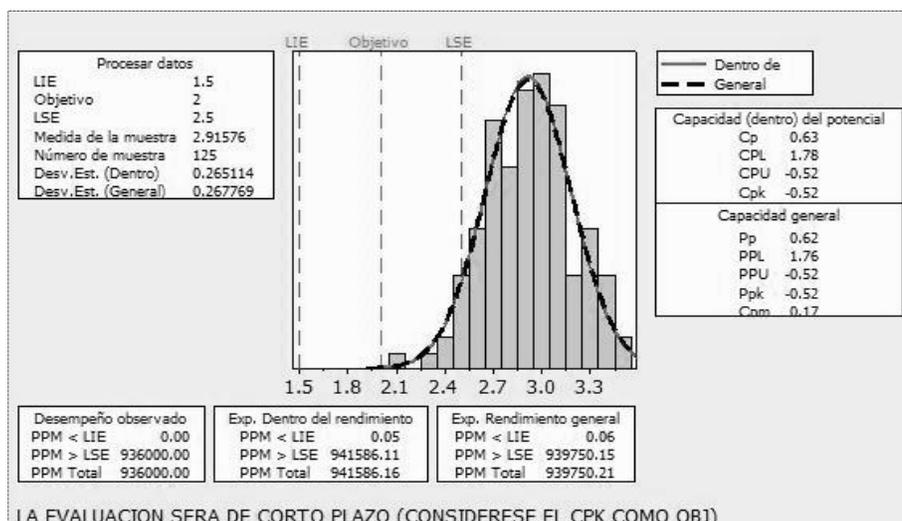
En base a los 125 mediciones de las muestras realizadas vemos en la Figura 1 que tienen un comportamiento NORMAL, donde el Pvalue =0.845 mayor que 0.05 de riesgo alfa. Esta prueba de normalidad nos permite avanzar en la evaluación de la capacidad del proceso con datos normales.

Figura 1. Normalidad de proceso



Fuente: Elaboración propia, software Minitab

Figura 2. Capacidad de proceso

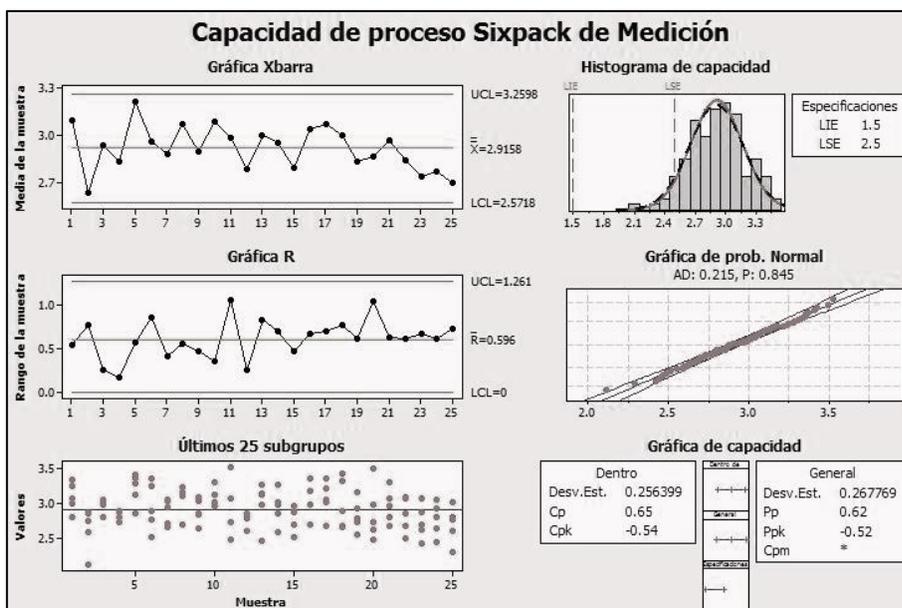


Fuente: Elaboración propia, software Minitab

Se puede observar que las muestras están sesgadas hacia la derecha fuera del límite superior de especificación, lo cual nos indica que estamos

aplicando pintura de más por carcasa, aunque tienen un comportamiento normal, lo que debemos hacer es llevar la variación hacia los límites de especificación que estamos buscando y no abrirlos, ya que si los abrimos estaremos aceptando aplicar más pintura por carcasa de la requerida y nos impacta en el costo del producto.

Figura 3. Capacidad de proceso



Fuente: Elaboración propia, software Minitab

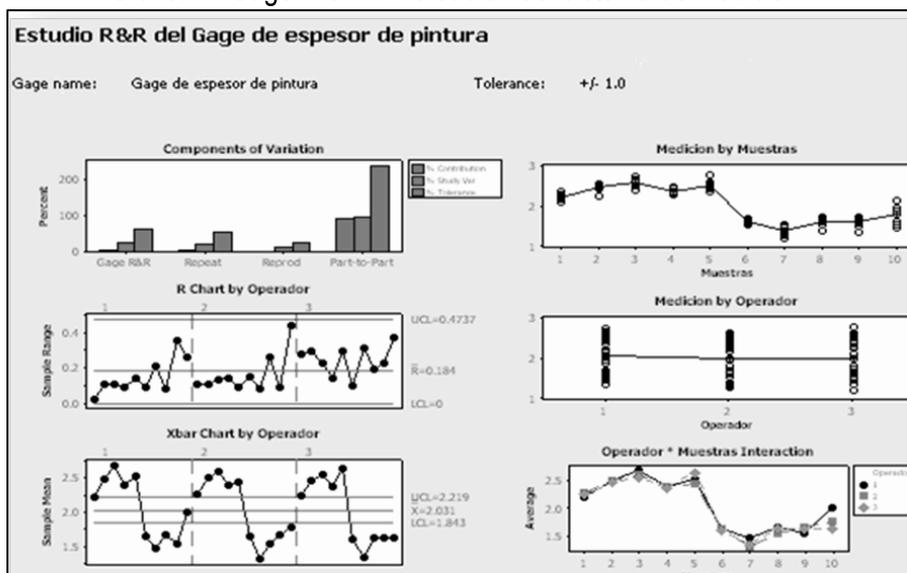
En resumen observamos que los datos son Normales, que están sesgados fuera del límite superior de especificación, que la media de las muestras es de 2.9158, nuestra capacidad del proceso a corto y largo plazo son muy pobres $C_p = 0.65$ y el $C_{pk} = -0.54$. Donde la relación de las tolerancias con la variabilidad natural del proceso (Carot, 1998) es la siguiente.

- Si $C_p < 1.33$ se dice que el proceso es no capaz.
- Si $C_p = 1.33$ se dice que el proceso es potencialmente justamente capaz.
- Si $C_p > 1.33$ se dice que el proceso es potencialmente capaz

La industria automotriz requiere que el C_p de una variable continua sea mayor a 1.33 para poder declarar al proceso potencialmente capaz.

Estudio de Gage R & R: Siguiendo con la fase de medición del DMAIC se realizó un estudio Gage R&R para validar si el sistema de medición del proceso es confiable, es decir repetible y reproducible (Escalante E. , 2008). El estudio se realiza con muestras de los 3 operadores que trabajan en la elaboración del producto. Mostrando los siguientes resultados en la gráfica 4.

Gráfica 4. Gage R & R. Evaluación del sistema de medición.



Fuente: Elaboración propia, software Minitab

Tabla 6. Gage R&R

Tabla Anova Gage R&R						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Muestras	9	17.7426	1.97140	101.657	0.000	
Operador	2	0.0480	0.02399	1.237	0.314	
Muestras * Operador	18	0.3491	0.01939	1.635	0.080	
Repeatability	60	0.7116	0.01186			
Total	89	18.8512				

Fuente: Elaboración propia, software Minitab

Tabla 7.1. Gage R&R. Estudio de variación

Source	%Contribution	
	VarComp	(of VarComp)
Total Gage R&R	0.014524	6.28
Repeatability	0.011860	5.13
Reproducibility	0.002664	1.15
Operador	0.000153	0.07
Operador*Muestras	0.002511	1.09
Part-To-Part	0.216890	93.72
Total Variation	0.231414	100.00

Fuente: Elaboración propia, software Minitab

Tabla 7.2. Gage R&R. Estudio de variación

Source	Study Var	%Study Var		%Tolerance
	StdDev (SD)	(5.15 * SD)	(%SV)	(SV/Toler)
Total Gage R&R	0.120516	0.62066	25.05	62.07
Repeatability	0.108904	0.56085	22.64	56.09
Reproducibility	0.051615	0.26582	10.73	26.58
Operador	0.012376	0.06374	2.57	6.37
Operador*Muestras	0.050109	0.25806	10.42	25.81
Part-To-Part	0.465714	2.39843	96.81	239.84
Total Variation	0.481055	2.47743	100.00	247.74

Nota: Number of Distinct Categories = 5

Fuente: Elaboración propia, software Minitab

Las Tablas 6 y 7 nos muestran que hay mucha variación entre las muestras y por eso el % de tolerancia sale muy alto, también vemos como esta variabilidad se ve impactada por las mediciones del operador 3, tenemos que reforzar con más capacitación a éste operador y mejorar más el método de la medición para disminuir esta variabilidad, sin embargo en base a estos resultados observamos que la interacción muestra operador esta aceptable aunque con un valor pobre de Pvalue. Apenas superior al 0.05 del riesgo alfa. Por otra parte nos permitió identificar que el instrumento de medición no era repetible en su medición y se procedió a calibrar todos los instrumentos. El objetivo de este análisis es mantener confiable el sistema de medición y la integridad de la información.

Fase Analizar

Siguiente con la fase de análisis. En este paso se debe de realizar una comparación o análisis de las variables “X’s” y cómo influyen en nuestra “Y” variable dependiente. Como primera instancia se debe de analizar y definir qué tipo de variables intervienen en el estudio como a continuación se presenta, esto es un punto muy relevante ya que también sustentará nuestro DOE y que tipo de herramienta utilizar. La Tabla 8 muestra un resumen de la definición de las variables.

Tabla 8. Definición de variables

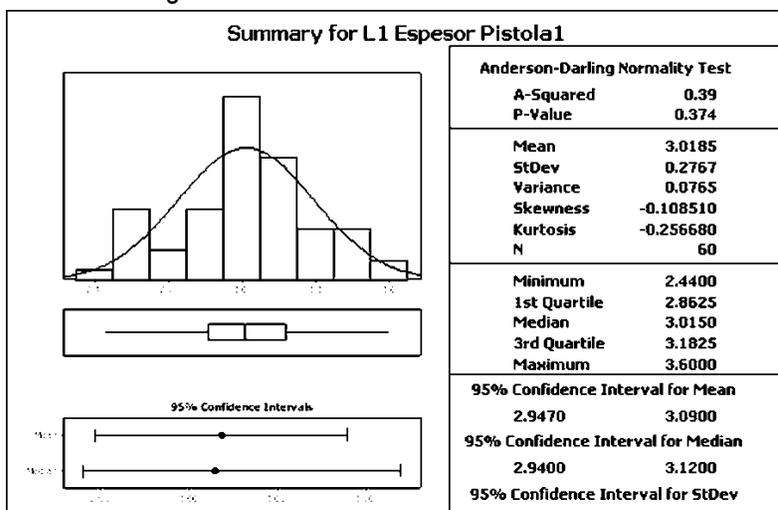
Nombre	Unidad de Medida	Descripción	Tipo de Variable	Relación con el métrico primario	Relación con el métrico crítico
Presión de flujo de polvo	Psi Libras por pulgada cuadrada	Presión con la que la pintura es alimentada a la pistola	Variable cuantitativa continua	A mayor cantidad de pintura mayor espesor de pintura en la carcasa	A menor cantidad de pintura ocasionaría re trabajos
Presión de flujo de aire	Psi Libras por pulgada cuadrada	Presión de aire que es alimentada a la pistola de pintura para proyectar la pintura en polvo	Variable cuantitativa continua	A mayor cantidad de pintura mayor espesor de pintura en la carcasa	A menor cantidad de pintura ocasionaría re trabajos
Voltaje de pistolas	Volts	Voltaje que le llega a la pistola de aplicación de pintura	Variable cuantitativa continua	El voltaje nos sirve para cargar negativamente la pintura en polvo para adherirla a la carcasa influyendo en el espesor de la misma	Si la pintura no está demasiado cargada no se adhiere a la carcasa ocasionando re trabajos
Amperaje	Micro amperes	Amperaje que le llega a la pistola de aplicación de pintura	Variable cuantitativa continua	El amperaje es la fuerza con la que proyectamos la carga magnética de la pintura, influyendo en el espesor de la aplicación a la carcasa	A mayor o menor fuerza de aplicación de la pintura pueden quedar áreas de la carcasa sin pintar
Velocidad de cadena	Pzs / min.	Piezas por minuto	Cuantitativa continua	A mayor o menor tiempo de exposición a la pintura el espesor puede variar	A mayor velocidad puede faltarle pintura a la carcasa
Velocidad de Giro	RPM	Revoluciones por minuto	Cuantitativa continua	A mayor o menor cantidad de giros el espesor puede variar	A mayor o menor cantidad de giros el espesor puede variar

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas nuestras variables que intervienen en el proceso de aplicación de pintura, se deben de realizar pruebas para verificar la normalidad de los datos en cada una de las variables independientes. Por ejemplo en las pistolas de aplicación, en este caso son 3 con el objetivo determinar si son variables relevantes en nuestra "Y" se procedió con dicha prueba. Véase la gráfica 5, donde se realizan pruebas de normalidad.

En la Figura 5 se presenta un estudio de normalidad. La realización de análisis de normalidad de las variables ya mencionadas nos permitirá usar las herramientas o técnicas adecuadas. Como podemos ver los datos de espesores obtenidos de estas lecturas de estas pistolas son normales, por lo tanto podemos analizar los datos de forma paramétrica.

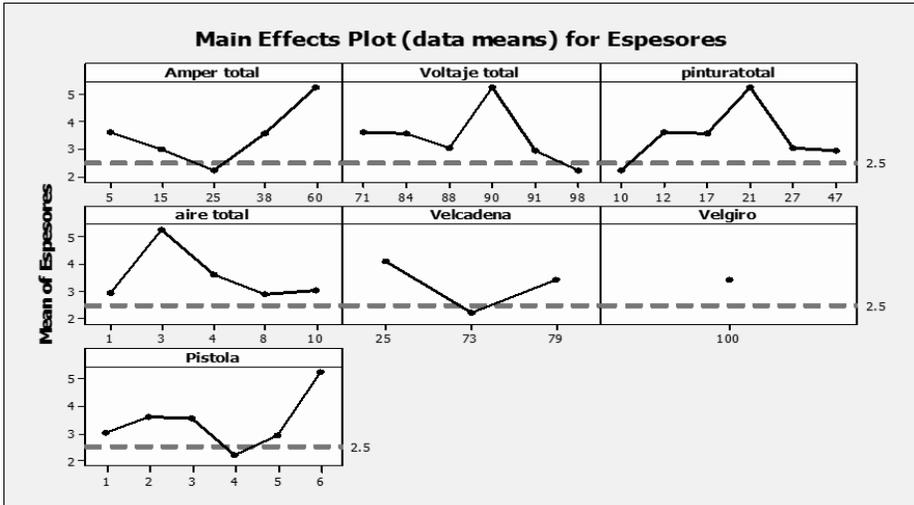
Figura 5. *Análisis de normalidad de variables*



Fuente: Elaboración propia, software Minitab

Por otra parte la Figura 6, el análisis exploratorio podemos ver de manera gráfica los efectos principales. Por ejemplo vemos como con un amperaje de 25, voltajes mayores a 95, pintura en 10, aire muy bajo 1 o altos como 8 y 9, velocidad de la cadena de 73 condiciones de la pistola 4, nos da espesores bajos fuera de la especificación del cliente. Esto nos permite ver que variables independientes son causa raíz del problema. Sin embargo es necesario utilizar la estadística inferencial para lograr validar lo anterior.

Figura 6. Análisis exploratorio de variables



Fuente: Elaboración propia, software Minitab

Una vez determinadas las variables de estudio “X’s” potenciales que pueden afectar los resultados, se deben de realizar las hipótesis de investigación. Para lo anterior se establecen las hipótesis de investigación y el método estadístico a utilizar para validar dicha causalidad. Véase Tabla 9.

En este caso de estudio se determina como factores las pistolas, voltajes, amperajes, presión, flujo de aire y la velocidad de la cadena. Para cada una de ellas se realizó la técnica ANOVA.

“El diseño para el análisis consistirá en obtener muestras aleatorias e independientes del valor de “Y” asociado a cada uno de los distintos niveles del factor X_1, X_2, \dots, X_n .

Se puede determinar si los diferentes niveles del factor tienen un efecto significativo sobre el valor de la variable dependiente.

El funcionamiento de la técnica ANOVA simple es, a grandes rasgos, el siguiente: a fin de comparar las medias de Y asociadas a los distintos niveles del factor (X_1, X_2, \dots, X_n), compararemos una medida de la variación entre diferentes niveles (MS-factor) con una medida de la variación dentro de cada nivel (MS-error). Si el MS-factor es significativamente mayor que el MS-error, concluiremos que las medias asociadas a diferentes niveles del factor son distintas. Esto significa que el factor influye significativamente sobre la

variable dependiente Y . Si, por el contrario, el MS-factor no es significativamente mayor que el MS-error, no rechazaremos la hipótesis nula de que todas las medias, asociadas a diferentes niveles del factor, coinciden". (Manuel Terrádez, Ángel A. Juan)

Tabla 9. Hipótesis de investigación

ID.	Hipótesis de Investigación	Método Estadístico	Hipótesis Estadística
1.	No hay diferencia en el espesor de pintura al aplicarla en cualquier pistola	One way ANOVA	Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j$ Ha: al menos una μ_j es diferente de las otras
2.	No hay diferencia en el espesor de pintura al variar el voltaje	One way ANOVA	Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j$ Ha: al menos una μ_j es diferente de las otras
3.	No hay diferencia en el espesor de pintura al variar el amperaje	One way ANOVA	Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j$ Ha: al menos una μ_j es diferente de las otras
4.	No hay diferencia en el espesor de pintura al variar la presión de la pintura aplicada al filtro	One way ANOVA	Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j$ Ha: al menos una μ_j es diferente de las otras
5.	No hay diferencia en el espesor de pintura al variar la presión de flujo de aire.	One way ANOVA	Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j$ Ha: al menos una μ_j es diferente de las otras
6.	No hay diferencia en el espesor de pintura al variar la velocidad de la cadena.	One way ANOVA	Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j$ Ha: al menos una μ_j es diferente de las otras

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al análisis de variables, se puede observar a manera de ejemplo en la tabla 10 los resultados de la técnica estadística One-Way Anova en esto con objetivo de determinar mediante un análisis inferencial cuales son las variables que realmente tiene peso para nuestra variable dependiente.

Tabla 10. Análisis inferencial, One-Way Anova. Ejemplo realizado de pistolas

Source	DF	SS	MS	F	P
Pistolas	5	325.955	65.191	514.02	0.000
Error	354	44.896	0.127		
Total	359	370.851			
S = 0.3561		R-Sq = 87.89%		R-Sq(adj) = 87.72%	

Fuente: Elaboración propia, Software Minitab

A continuación se presentan los resultados obtenidos a manera de resumen.

Estudio de pistolas: Se observa un valor de $P \text{ value} = 0$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y *aceptamos la hipótesis alterna de que existe una diferencia significativa en el espesor de pintura aplicada en diferentes pistolas*, por lo tanto concluimos que las pistolas si afectan el espesor de pintura.

Para el estudio de Amperaje: Se observa un valor de $P \text{ value} = 0$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y *aceptamos la hipótesis alterna de que existe una diferencia en el espesor de pintura aplicada un amperaje diferente*, el amperaje de 25 nos ayuda a tener espesores menores. Por lo tanto concluimos que el amperaje si afecta el espesor de pintura.

Para el estudio de prueba de voltaje: Se observa un valor de $P \text{ value} = 0$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y *aceptamos la hipótesis alterna de que existe una diferencia en el espesor de pintura aplicada un voltaje diferente*, el voltaje de 98 Volts nos ayuda a tener espesores menores, analizando los residuos vemos un comportamiento normal con un $P \text{ value} = 0.503$. Concluimos que los voltajes si afectan el espesor de pintura.

Para el estudio de prueba de presión de pintura: Se observa un valor de $P \text{ value} = 0$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y *aceptamos la hipótesis alterna de que existe una diferencia en el espesor de pintura aplicada a una presión de pintura diferente*, la presión en la pintura de 10 PSI nos ayuda a tener espesores menores, analizando los residuos vemos un comportamiento normal con un $P \text{ value} = 0.503$. Concluimos que la presión de la pintura si afectan el espesor de pintura.

Para la prueba de presión de aire: Se observa un valor de $P \text{ value} = 0$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y *aceptamos la hipótesis alterna de que existe una diferencia en el espesor de pintura aplicada a una presión de aire diferente*, la presión de aire de 1, 8 y 10 PSI nos ayuda a tener espesores menores, analizando los residuos vemos un comportamiento normal con un $P \text{ value} = 0.318$. Concluimos que la presión de aire si afecta el espesor de pintura.

Para la prueba de velocidad de transporte: Se observa un valor de $P \text{ value} = 0$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y *aceptamos la hipótesis alterna de que existe una diferencia en el espesor de pintura debido a la velocidad de la cadena*, a una velocidad de 73 pz/min, nos ayuda a tener

espesores menores. Concluimos que la velocidad de la cadena si afecta al espesor de pintura.

De acuerdo a los resultados de las corridas de One Way Anova de las variables independientes se ha llegado a la siguiente conclusión en el estudio, que todas las variables son estadísticamente significativas. A pesar de que lo son. En nuestro objeto de estudio se descartará la variable pistola, por cuestiones de presupuesto.

También se descarta la velocidad del transportador de las carcasas, ya que el proceso está condicionado a trabajar en las velocidades definidas y nos piden no afectar la productividad del proceso. Además no podemos desbalancear la productividad como justificación del proyecto en estudio, en resumen tendremos que balancear las otras variables a estas restricciones.

Para nuestra fase de mejora, las variables que se llevan al Diseño de Experimento serán: Voltaje, Amperaje, Presión de pintura y presión de aire. El diseño de experimentos se puede definir como un conjunto de métodos que se utilizan para manipular un proceso con el fin de obtener información de cómo mejorarlo (Sánchez, 2009).

Fase Mejorar

En esta fase del estudio, se investiga mediante un modelo matemático cual debe ser el valor de ajuste de nuestras variables independientes "X's" para obtener los resultados esperados en nuestra "Y" variable dependiente. A continuación detallamos los pasos realizados en el experimento.

- *Paso 1 Establecer el problema práctico.*

El espesor promedio de las carcasas es muy alto esta en 3.8 milésimas de pulgada y queremos controlarlo a un promedio de 2.5 milésimas de pulgada.

- *Paso 2 Establecer el objetivo del Experimento.*

Encontrar los parámetros para obtener un espesor de pintura de 2.5 milésimas de pulgada o menor hasta donde sea posible tomando en cuenta que la especificación mínima es de 1.5 y la apariencia de la carcasa metálica.

- *Paso 3 Seleccionar la variable de respuesta.*
Espesor de la carcasa en el cuerpo de la misma.
- *Paso 4 Seleccionar los factores de entrada y seleccione los niveles de los factores*
Para los factores de entrada se seleccionaron el voltaje, amperaje, pintura y aire. En la Tabla 11 se muestran sus respectivos niveles, basados en los manuales del equipo del fabricante.

Tabla 11. Diseño de experimento fraccionado

Factores	Niveles	Bajo	Alto	Un. de medida
Voltaje	Bajo / Alto	80	100	Volts
Amperaje	Bajo / Alto	10	40	Amperes
Pintura	Bajo / Alto	0.5	1	BAR
Aire	Bajo / Alto	0.1	0.8	BAR

Fuente: Elaboración propia, Software Minitab

- *Paso 5 Seleccionar el diseño de experimento y el tamaño de muestra.*
Para lo anterior se realizó un DOE factorial fraccionado con 2 réplicas.
Tamaño de muestra = 16

Donde este experimento consta de dos o más factores, con diferentes valores experimentales y la intención es cubrir toda la combinación de variables posibles. Esto permitirá el estudio del efecto de cada factor sobre la "Y", así como el efecto de las interacciones entre factores

La matriz de experimentación de la Tabla 12 nos permite establecer las corridas requeridas y réplicas para nuestro experimento en un orden aleatorio. El experimento factorial fraccionado nos permite observar el efecto que tiene cada variable independiente sobre la variable dependiente, así como el efecto que tienen las interacciones entre estas variables. Se deben definir los factores y niveles del experimento.

La ventaja de este diseño es la cantidad de corridas, ya que se optimiza sin tener que ser una muestra muy grande de experimentos. Un factor es

cualquier influencia que pueda afectar a la variable de respuesta y que sea controlada por el experimentador. Los niveles son las categorías o intensidades que tiene cada factor previamente establecido. En un diseño factorial fraccionado es necesario al menos dos réplicas para poder analizar las observaciones de los efectos principales y las interacciones, de esta forma se pueden probar las hipótesis que se formularon previamente.

Tabla 12. Matriz de experimentación

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Voltaje	Amperaje	Pintura	Aire
14	1	1	1	100	10	1	0.1
6	2	1	1	100	10	1	0.1
1	3	1	1	80	10	0.5	0.1
2	4	1	1	100	10	0.5	0.8
15	5	1	1	80	40	1	0.1
8	6	1	1	100	40	1	0.8
9	7	1	1	80	10	0.5	0.1
10	8	1	1	100	10	0.5	0.8
11	9	1	1	80	40	0.5	0.8
4	10	1	1	100	40	0.5	0.1
16	11	1	1	100	40	1	0.8
13	12	1	1	80	10	1	0.8
7	13	1	1	80	40	1	0.1
5	14	1	1	80	10	1	0.8
12	15	1	1	100	40	0.5	0.1
3	16	1	1	80	40	0.5	0.8

Fuente: Elaboración propia, con Software Minitab.

En la Tabla 13 se pueden observar los resultados obtenidos del diseño de experimentos. Lo cual nos permitió establecer el modelo matemático que predice nuestra variable dependiente.

$$\text{Espesor de pintura} = (0.6150 * \text{Pintura}) - (0.3900 * \text{Aire}) + 2.6450$$

Tabla 13. Resultados del Diseño de Experimentos. Tabla ANOVA

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constante		2.6450	0.1313	20.15	0.000
Pintura		1.2300	0.1313	4.68	0.002
Aire		-0.7800	0.1313	-2.97	0.018

Nota 1: S = 0.504579

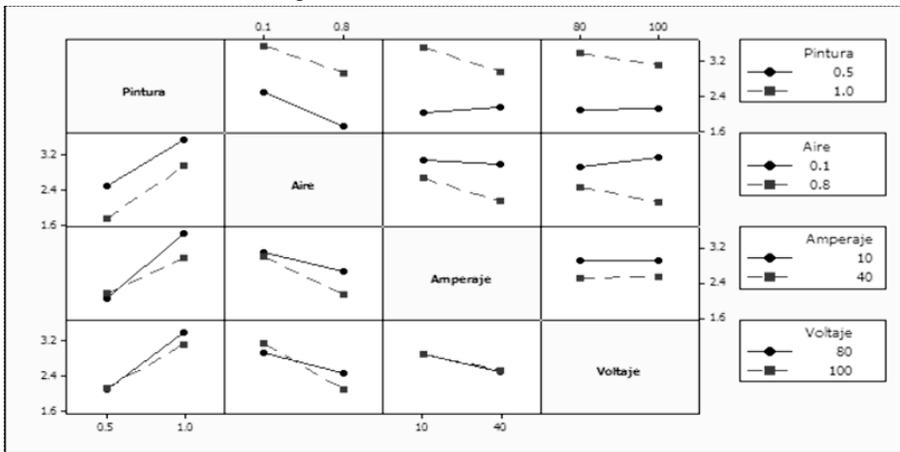
Nota 2: R-Sq = 80.49%

Nota 3: R-Sq (adj) = 63.42%

Fuente: Elaboración propia, con Software Minitab.

De acuerdo a los datos obtenidos se corre la gráfica de interacción y de efectos principales. Véase a continuación en la Figura 7 y Figura 8.

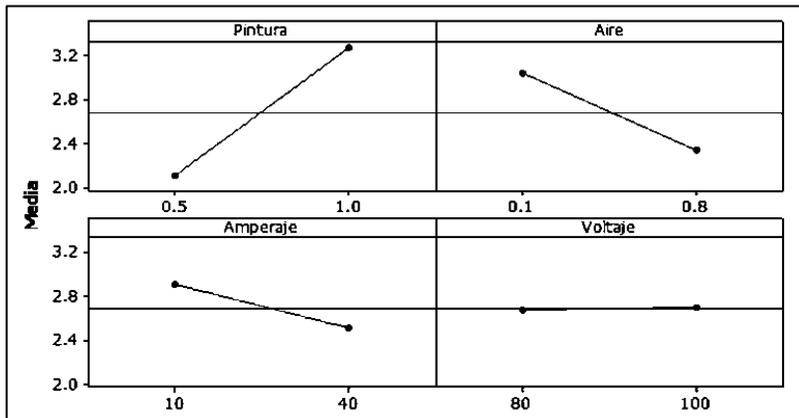
Figura 7. Gráfica de Interacción



Fuente: Elaboración propia, Software Minitab.

La Figura 8 de interacciones nos muestra que la pintura es independiente con respecto a las demás variables, nos dice que a menor pintura menor espesor, no hay interacciones significativas, hay unas ligeras interacciones entre el voltaje y aire, pero revisando el P Value que es de 0.299 extraídos del ANOVA nos dice que no es significativa al igual que las demás interacciones no son significativas en base a sus P value, otra variable significativa es el aire.

Figura 8. Gráfica de efectos principales

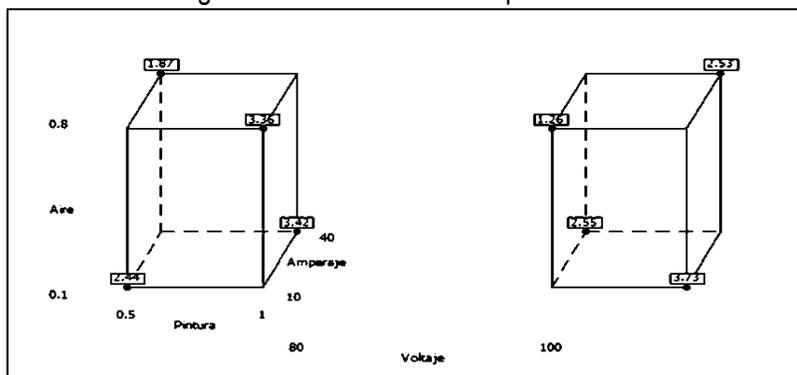


Fuente: Elaboración propia, Software Minitab

La Figura 8 de efectos principales nos dice que el amperaje no es muy significativo en bajo y alto, lo mismo sucede con el Voltaje, y el Aire si es significativo, a más aire menos espesor, vemos claramente que la pintura es la variable que es más significativa, a menor pintura menor espesor.

Las únicas variables que ajustaremos de acuerdo al resultado obtenido del diseño experimental será la de pintura y aire, las demás variables las manejaremos en éstos rangos ya que no son significativas.

Figura 9. Gráfica de cubo experimental



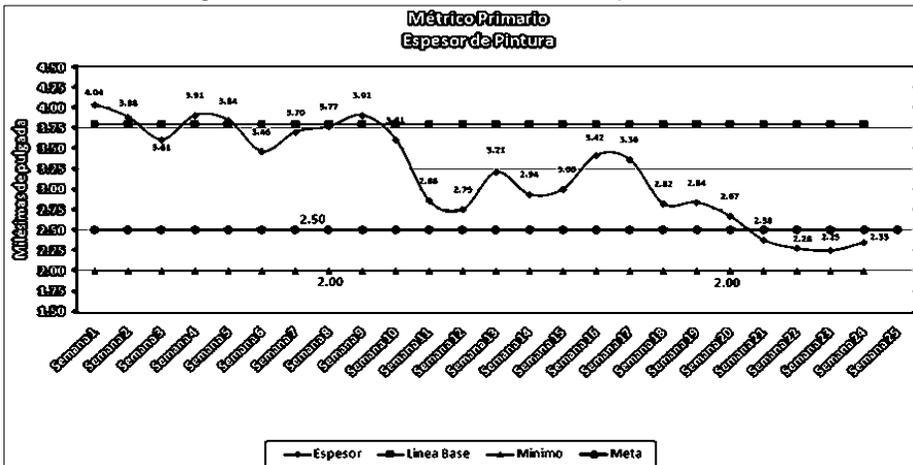
Fuente: Elaboración propia, Software Minitab

En la Figura 9, podemos saber cuáles son los niveles óptimos de cada factor. Lo anterior para optimizar nuestro proceso. Las gráficas de cubo se pueden utilizar para mostrar las relaciones entre de dos a ocho factores, con o sin medida de respuesta, para los diseños factoriales de 2 niveles o de Plackett-Burman. En el proyecto de estudio sirvió para identificar el vértice que optimiza mejor nuestra variable dependiente.

Fase Controlar

En esta fase del proyecto los líderes de manufactura deben diseñar un plan de contingencia para asegurar que el estudio realizado a la variable de la “Y”, sea controlada de acuerdo a especificaciones obtenidas en los modelos matemáticos, así como los efectos del modo de fallo potencial encontrado en la fase de análisis. Este se realiza con el objetivo de garantizar la implementación, estabilidad y mejora del proyecto. El resultado del proyecto puede verse en la Figura 10.

Figura 10. Monitoreo de la variable dependiente



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la gráfica 10 podemos observar que se logra el objetivo para nuestra variable dependiente. Ahora se tendrá que mantener este esfuerzo de mejora a lo largo del tiempo.

Para este propósito se llevaron las variables “X’s” encontradas al plan de control de la producción y a las instrucciones de operación del equipo, donde vienen establecidos los parámetros que mejor nivel de respuesta nos dan para nuestro objetivo.

Se debe de tener en cuenta que la intervención primaria es realizada por la gente base de la empresa por lo cual se recomienda realizar diseños sencillos de entender e interpretar por cualquier operador. Para este estudio se determinó controlar dicha métrica mediante una gráfica de X-R, para la validación de resultados y seguimiento. La supervisión dará todo el apoyo cuando dicha métrica no cumpla con la meta.

Además se colocaron ayudas visuales donde se encuentran las imágenes de los equipos y los puntos de calibración adecuados, así como una matriz de problemas comunes, soluciones y causas, todo esto mediante un entrenamiento del personal continuo para garantizar la permanencia y la estandarización de las mejoras.

Conclusiones

Como conclusión del proyecto con el análisis DMAIC se logró reducir el consumo de pintura en polvo para carcasas metálicas en una primer instancia de 32% sobre pieza traducido a más de \$1, 000,000.00 de pesos de reducción de gastos anualmente. Otorgando mayor capacidad de activo revolvente para la empresa para realizar inversiones, investigaciones o simplemente ser más rentable ante los competidores reduciendo los costos de operación sin arriesgar la calidad de los productos.

El estudio de capacidades de un proceso es una excelente herramienta estadística con los objetivos de demostrar que un proceso que cumple con los requerimientos de sus clientes y que puede ser siempre mejorado.

En lo que respecta al DOE. Esta herramienta orienta a como se deben de ejecutar los procesos de acuerdo a las necesidades de los productos, ya que al analizar un número indefinido de variables define cual es la mejor combinación de estas para lograr los objetivos. Es decir, al controlar las variables del proceso aumenta el control de la variable dependiente “Y”. Después de lograr reducir la variabilidad, es más fácil aumentar la capacidad y simplificar los procesos.

Agradecemos a la empresa las facilidades otorgadas para realizar esta investigación empírica. El caso de estudio permitirá entender el proceso metodológico del Seis Sigma, el pensamiento estadístico y la aplicación práctica del método científico para resolver problemas en una empresa.

En cuanto a las limitaciones de este trabajo se encuentra lo siguiente: un diseño de caso de estudio transversal no permite una evaluación de las relaciones de causalidad. Es necesario un estudio longitudinal que favorezca la posibilidad de establecer las relaciones de causalidad.

En cuanto a la investigación futura, es necesario profundizar con más casos de estudio para identificar aquellas prácticas exitosas que permiten la correcta implementación de la metodología Seis Sigma. El promover la investigación aplicada y el pensamiento científico permitirá a las compañías mexicanas reducir costos y generar nuevos ingresos.

Referencias

- Acuña, J. (2003). *Ingeniería de confiabilidad*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.
- Adams, C. Gupta, P. & Wilson, C. (2003). *Six sigma deployment*. Burlington: Butterworth-Heinemann.
- Alonso, A. (2003). *Análisis en los defectos de un simulador*. Madrid: Departamento de ingeniería de la Universidad de Madrid.
- Antony, J. y Bañuelas, R. (2002). Key ingredients for the effective implementation of six sigma program. *Measuring Business Excellence*, 6(4), 20-27.
- Breyfogle, F.W. III. (1999). *Implementing six sigma: Smarter solutions using statistical methods*. New York: John Wiley & Sons.
- Cassettari, C., Batocchio, A., & Marcondes, A., (2005). Lean manufacturing and six sigma, *SAE Technical Paper*, 2005-01-4047, 1-11.
- Carot, V. (1998). *Control estadístico de calidad*. Valencia: Servicios de publicaciones Universidad Politécnica de Valencia
- Dennis, P. (2002). *Lean production simplified*. New York: Productivity Press.
- Dreachslin J. & Peggy D. (2007). Applying six sigma and DMAIC to diversity initiatives, *Journal of healthcare management*, 52(6), 361-367.
- Evans, J. R. (2008). *Administración y control de la calidad*. Cd. de México: CENGAGE.
- Escalante, E. (2008). Seis sigma, metodología y técnicas. Cd. de México: Limusa.
- Garza V, J. B (2013). Aplicación de diseño de experimentos para el análisis de secado de un producto, *Innovaciones de Negocios*, 10(19), 145-158.
- Ginn, D. (2004). *The desing for six sigma*. Methuen: GOAL/QPC.
- Gutierrez, H. (2009). *Control estadístico de la calidad y seis sigma*. Guadalajara: McGraw Gill.
- Harry, M.J. & Schroeder, R. (1999). *Six sigma: The breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations*. New York: Doubleday.

- Hasanah I. S; Hermana B. & Hastiyani H. (2007). Application of six sigma method using DMAIC method on string production, *Proceedings of the International Seminar on Industrial Engineering and Management*, J24-29.
- Herrscher, E. (2010). *El valor sistémico de las organizaciones*. Cd. de México: Granica.
- Hoerl, R. W. (1998). Six sigma and the future of the quality profession, *Quality Progress*, 31(6), 35-38.
- Hoerl, R. W. (2001). Six sigma black belts: what do they need to know?, *Journal of Quality Technology*, 33(4), 391-406.
- Juran, J. (1990). *Juran y el liderazgo para la calidad*. Madrid: Díaz de Santos.
- Lynch D., Bertolino S. & Cloutier, E. (2003). How to scope DMAIC projects, *Quality Progress*, 36(1), 37-44.
- Martínez, M. & Garza, J. B. (2012). Reducción de costos asociados a los desperdicios de un producto perteneciente a una empresa manufacturera, *Innovaciones de Negocios*, 10(20), 197-219.
- Meier, J. L. (2006). *The Toyota way fieldbook*. New York: McGraw Hill.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley.
- Keller, P. A. (2001). *Six sigma deployment*, Tucson: Quality Publishing.
- Pande, P. Neuman, R. & Cavanagh, R. (2001). *The six sigma way*. New York: Mc Graw Hill.
- Pyzdek, T. (2014). *The six sigma handbook: A complete guide for greenbelts, blackbelts and managers at all levels*. New York: Mc Graw Hill.
- Salafranca, L. (2005). *Análisis estadístico mediante aplicaciones informáticas: SPSS, Stratgraphics, Minitab y Excel*. Barcelona: Gráficas Rey.
- Sánchez, G. (2009). *Medición del ruido en la línea de transmisión eléctrica generado por electrodomésticos, para aplicaciones de PLC*. Tesis para obtener el título de Licenciado en Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones por la Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería.
- Snee, R. (1999). Why should statisticians pay attention to six sigma?, *Quality Progress*, 32(9), 100-103.
- Snee, R. (2003). *Leading six sigma*. Nueva Jersey: Pearson.
- Sokovic M., Pavletic D. & Kern K. (2010). Quality Improvement Methodologies PDCA, Cycle, RADAR Matrix, DMAIC and DFSS, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 43(1), 476-483.
- Tanco M., Viles E. & Pozueta L. (2009). Comparing different approaches for design of experiments (DoE). In Gelman, Len (Ed.), *Advances in electrical engineering and computational science*, Dordrecht: Springer, 611-622.
- Terradez M., & Juan, A. (2002) Análisis de Variables (Anova) Proyecto e-Math 18. Financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD)
- Tolamatl, J., Gallardo, D., Varela, J. & Ávila E. (2011). Aplicación de seis sigma en una microempresa del ramo automotriz, *Conciencia Tecnológica*, 42, 11-18.
- Tovar, A. (2007). *CPIMC Un modelo de administración por procesos*. Cd. de México: Panorama Editorial.
- Womack, J. & Jones, D.T. (1996). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation*. London: Simon and Shustecer.