

# Análisis del proceso de pintura esmalte en estructuras automotrices mediante Lean Six Sigma-Fase III

Reina Salvatore<sup>1</sup>; Ayabaca César<sup>2</sup>; Tipanluisa Luis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones Quito, Ecuador

<sup>2</sup> Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador

---

**Resumen:** Se analizó el proceso de aplicación pintura esmalte en las estructuras automotrices con apariencia piel de naranja (i.e textura) de diferente longitud. Se realizó el despliegue de las matrices CTX (i.e características críticas del proceso) temperatura de horno, presión de aire, porcentaje de sólidos y CTY (i.e características críticas del producto) como piel de naranja. Se aplicó el diseño de experimentos factorial fase III de la metodología Lean Six Sigma, de interacción de las características críticas del proceso con las características críticas del producto. Se determinan los efectos significativos sobre las características críticas del proceso (porcentaje de sólidos 36,87%, temperatura del horno 132 °C y presión de aire 85 PSI) que disminuyen el efecto piel de naranja, aumentando el rating hasta un valor optimizado de 6,80. Con los valores optimizados se procede a calibrar el proceso de aplicación pintura esmalte en estructuras automotrices para obtener satisfacción del cliente.

**Palabras clave:** Pintura esmalte, piel de naranja, lean six sigma, estructuras automotrices.

## Analysis of the process enamel paint in automotive structures with Lean Six Sigma-Phase III

**Abstract:** The process of application was analyzed painting enamels in the car structure with appearance peel orange or dark shades of different length. There realized the deployment of the counterfoils CTX (i.e critical characteristics of the process) temperature of oven, air pressure, percentage of solid and CTY (i.e critical characteristics of the product) as peel orange. The experimental design was applied factorial of the phase III of the methodology Lean Six Sigma, of interaction of the critical characteristics of the process with the critical characteristics of the product. There decide the significant effects on the critical characteristics of the process (solid 36,87 %, temperature of the oven 132 °C and air pressure 85 PSI) that diminish the effect peel orange, increasing the rating with optimized value of 6,80. One proceeds to calibrate the process of application enamel paint in the automotive structures to obtain satisfaction of the client.

**Keywords:** Painting enamels, peel orange, lean six sigma, automotive structures.

---

### 1. INTRODUCCION

Las estructuras automotrices al ser sometidas a un proceso de aplicación de pintura esmalte presentan una textura de forma ondulada con asentamientos entre claros y oscuros que se conoce como piel de naranja (Ansdell, 1999). La pintura aparte de dar una buena apariencia a la carrocería cumple con el propósito de proteger de la radiación ultravioleta, lluvia ácida y de los efectos del agua y el clima (Bender, 2013). Los procesos de aplicación de pintura esmalte se lo realiza en cabina, las variables que intervienen son analizadas cualitativamente con modos de fallo y efecto (GMS, 2006). De acuerdo a la estructura de mejora continua una vez que se dispone del análisis cualitativo es necesario efectuar el análisis experimental para estandarizar el proceso (Reina, 2014). La fase III de la metodología Lean Six Sigma se

caracteriza por realizar el análisis experimental factorial de las variables, partiendo del análisis de modos de fallo y efecto. La casa de la calidad es utilizada para el despliegue de las matrices desde las características que involucran al cliente hasta el producto final. Con Lean Six Sigma se parte de una evaluación previa de las características críticas del proceso que impactan significativamente en el producto, que es el caso de la medición del acabado superficial de la estructura automotriz al ser sometido a una aplicación de pintura esmalte (Montgomery, 2005). El proceso para determinar si un vehículo tiene manchas oscuras cortas o largas (i.e piel de naranja) que refleja la textura del acabado es una inspección visual (GCA, 2006). El Wave-scan Plus es un medidor de la textura de las superficies pintadas que indican la longitud de onda de las manchas que se presentan. El "rating" es un valor de rango de ondulaciones de onda que indica la medida del efecto piel de naranja en las estructuras automotrices que han sido sometidas a un proceso de aplicación de pintura. Las mediciones del perfil óptico luminoso de las superficies

---

salvatore.reina@epn.edu.ec.

pintadas dan lugar a ondulaciones de longitud de corta o larga onda. En lo referente al proceso de pintura las plantas automotrices siguen utilizando el modo de fallos y efectos cuyos análisis se encuentran desplegados en los puestos de trabajo.

La metodología Lean Six Sigma en la fase analizar se enfoca en el diseño experimental para efectuar el análisis cuantitativo de las características críticas del proceso que influyen significativamente en el producto (Salvendy, 2001).

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales y Equipos

#### 2.1.1 Estructura automotriz y Medidor Wave-scan PLUS

Se utilizó una estructura automotriz de acero aleado tipo SAE que ha sido sometida a un proceso de aplicación con pintura esmalte del proveedor DUPONT. Una vez terminada la aplicación de pintura la estructura automotriz se encuentra en el patio de terminados esperando la auditoria GCA, que es el análisis de unidades desde el punto de vista de percepción del efecto piel de naranja del cliente antes de liberar las unidades de fábrica. De acuerdo al sistema global de manufactura se escogen cinco unidades, entre los parámetros a medir está la piel de naranja en unidades de “rating” (GCA, 2006).

Para medir las diferentes longitudes de onda se utiliza el medidor Wave-scan PLUS que fue desarrollado entre otros por Toyota. Es un medidor de piel de naranja que se coloca sobre las estructuras automotrices después de que han sido pintadas en las cabinas.

Es aplicable en rangos de (0,1 – 12) mm de longitud de onda el cual es un parámetro fundamental en las superficies con piel de naranja. En ondulación corta ( $0,1 < \lambda \leq 0,6$ ) mm se percibe un efecto visual muy brillante desde una distancia mayor a 50 cm respecto a la superficie pintada. La ondulación larga ( $0,6 < \lambda \leq 10$ ) mm, es el parámetro más importante para determinar piel de naranja (GMS, 2006).

### 2.2 Métodos

El análisis del proceso de pintura esmalte se lo realizó con la metodología Lean Six Sigma en lo que respecta a la fase III. Entre las herramientas para la fase analizar se utilizó diseño de experimentos para las características críticas del proceso (CTX) que afectan a la (CTY) o piel de naranja (Salvendy, 2001).

En la Figura 1, se indica la metodología para aplicar la fase III de Lean Six Sigma en el análisis de la textura de los automóviles.

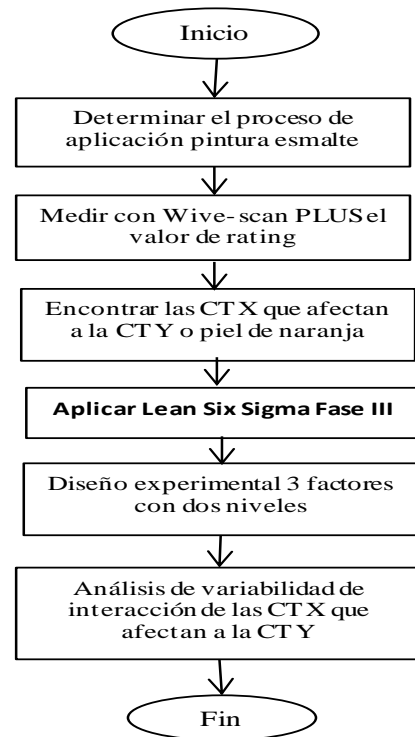


Figura 1. Estrategia para aplicación de la fase analizar de Lean Six Sigma.

#### 2.2.1 Proceso de aplicación pintura esmalte

Para el análisis del proceso se desplegó las actividades fundamentales que se realizan en el interior de la cabina de aplicación de pintura. Se encuentran desplegadas las hojas de trabajo estandarizado que se realizan sobre la estructura automotriz. En la Figura 2, se muestra el proceso de aplicación de pintura esmalte con su respectivo trabajo estandarizado.

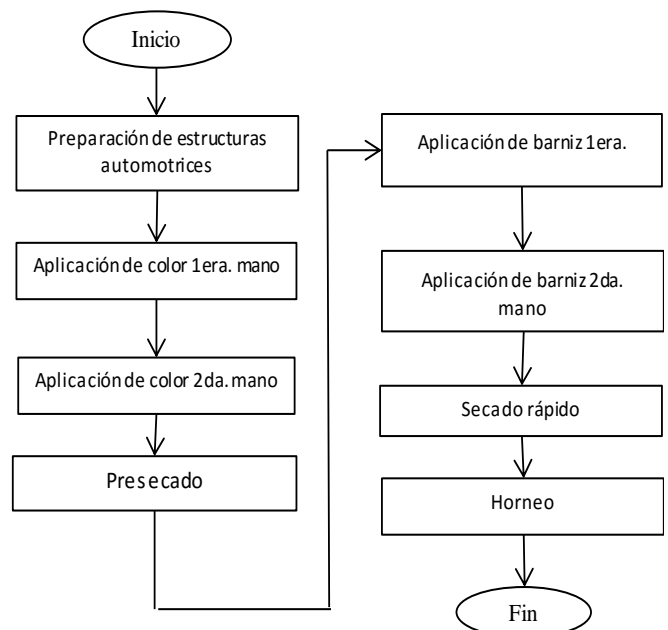


Figura 2. Proceso de aplicación pintura esmalte.

Para determinar del efecto piel de naranja se debe colocar el lente del medidor sobre el punto de medición (puertas, capot o techo). Para efectuar la operación se debe mantener presionado el botón operate y mover el medidor hacia delante rodándolo sobre sus ruedas, como se indica en la Figura 3. Se toman tres lecturas de rating en cualquier punto de la superficie, en superficies de considerable dimensión deberán tomarse las mediciones de rating aleatoriamente. La distancia entre los puntos de medición debe ser de aproximadamente 50 cm. Se debe registrar el promedio de las mediciones (GCA, 2006).



Figura 3. Medición (rating) en superficies pintadas automotrices.

### 2.2.2 Características críticas del proceso que afectan a la textura

Las características críticas del proceso son las que definen las condiciones de la cabina de pintura esmalte que deben ser reguladas de acuerdo al tipo de aplicación sobre la superficie automotriz. Para la aplicación de pintura de cabina se determinó que la presión de aplicación, la temperatura del horno y el porcentaje de sólidos de la pintura afectan considerablemente al acabado de la superficie.

En la Tabla 1, se indica las variables de cabina que intervienen en el proceso de aplicación de pintura de las estructuras que pasan por la cadena transportadora. Se presentan en la matriz de priorización de características críticas del proceso y que inciden significativamente en la textura superficial de las estructuras que son: % sólidos, presión de aire y temperatura del horno. La matriz de priorización se obtiene efectuando la calificación: 1: Baja incidencia significativa, 3: Mediana incidencia significativa, 9: Alta incidencia significativa, (Taguchi, 2005).

Al aplicar Lean Six Sigma fase III, se efectúa una aproximación de las características críticas del proceso partiendo de las condiciones en las que opera la cabina de pintura. El análisis multivariable que corresponde a la fase III del diseño experimental se lo realiza con los siguientes factores: porcentaje de sólidos (18-36) %, presión de pistola de aire (70-80) PSI y temperatura de horno (156-160) °C correspondiente a un valor de piel de naranja de 6,45 rating.

Tabla 1. Matriz de priorización características críticas del proceso

Prior. CTY	Especificaciones	CTY seleccionadas			Prior. CTX	
		1	2	3		
		Brillo	Espesor	Apariencia piel de naranja		
	Flujo de fluido	440- 480 ml/min	1	3	9	34
	Temperatura de Presecado	40 - 50 °C	3	3	3	18
	Temperatura Flash Off (entrada)	30 - 45 °C	1	1	3	12
	Sólidos (%)	18 - 36%	3	3	9	36
C T Y	Humedad Relativa	45 - 75%	3	3	3	18
	Presión de aire	75 - 85 PSI	3	3	9	36
	Presión pintura	35 - 45 PSI	1	3	9	34
	Temperatura Cabina Base	20 - 26%	9	3	3	24
	Viscosidad Color	22 - 27 seg a 25 °C	3	9	3	30
	Temperatura del Horno	135 °C en 10 min	9	9	9	54

Para la planificación de la corrida experimental las características críticas del proceso se las considera como los factores con dos niveles. El diseño experimental indica los valores de piel de naranja en rating a medida que varían los factores interrelacionados con los niveles.

Se utilizó el software Minitab 16 con el módulo diseño de experimentos y Taguchi. Los valores de rating para obtener una textura de piel de naranja a satisfacción del cliente es de 5,5 a 7 (GCA, 2006). Para el análisis de variabilidad en las estructuras automotrices se planteó lo siguiente:

$H_0$ = La presencia de piel de naranja no tiene efectos significativos con relación al % de sólidos, presión de aire y temperatura del horno.

$H_1$ = La presencia de piel de naranja tiene efectos significativos con relación al % de sólidos, presión de aire y temperatura del horno.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las plantas ensambladoras automotrices el acabado superficial en lo que respecta a la textura representa la carta de presentación de la marca desde el punto de vista visual. Durante el proceso de aplicación en cabina se originan superficies en la estructura automotriz de (0,1 a 10) mm como se indica en la Figura 4, se reflejan manchas oscuras y claras dicho estado se conoce como efecto piel de naranja.

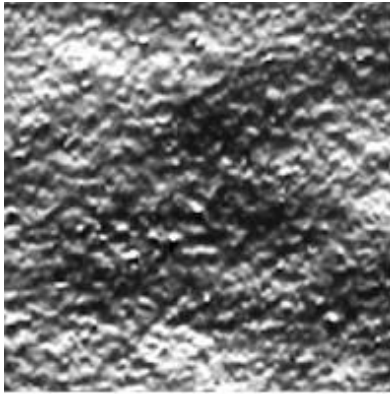


Figura 4. Superficie de estructura automotriz (0,1-10) mm.

La característica crítica piel de naranja para que no impacte visualmente al cliente debe encontrarse en un intervalo de  $5,5 < \text{rating} \leq 7,0$  con la tendencia de obtener valores óptimos cercanos a un rating de 7,0. El “rating” depende de las características del proceso de pintura en lo que respecta a temperatura del horno, presión de aplicación de aire y porcentaje de sólidos como se indica en la Tabla 1. Las condiciones del proceso en cabina de aplicación antes de la fase III de la metodología Six Sigma son: porcentaje de sólidos (18%-36%), temperatura del horno (156°C-160°C) y presión de aire (70PSI-80PSI).

### 3.1 Resultado del diseño experimental para piel de naranja

Con las características críticas del proceso de la cabina de pintura se plantea un diseño experimental factorial  $2^k$  con tres factores. En la Figura 5, con mediciones de piel de naranja a condiciones antes de la fase III el análisis multivariable indica la tendencia de “rating” hacia un valor de 7,0 a medida que va moviéndose los puntos de temperatura hacia la parte superior en lo referente a porcentaje de sólidos y presión de aire. La tendencia indica que el valor de “rating” va aumentando en la dirección creciente superior de la Figura 5.

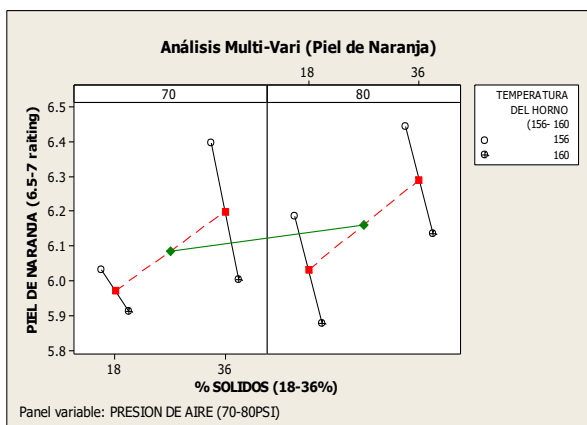


Figura 5. Análisis multivariable aproximación para diseño experimental I.

Para el diseño experimental I se redefinen los intervalos de las tendencias de las características críticas del proceso a los niveles: porcentaje de sólidos (18-36) %, temperatura del horno (135-140) °C, presión de aire en las pistolas (75-85) PSI, como se observa en la Tabla 2 arriba. Se evidencia en la corrida experimental con los intervalos de cada factor un

aumento del valor de “rating” con tendencia a 7,0. La corrida experimental permite visualizar los valores para la calibración del proceso de pintura esmalte de las estructuras a medida que van trasladándose por la línea de producción. Por lo general las plantas automotrices de ensamble en el proceso pintura esmalte efectúan las calibraciones de manera cualitativa con el análisis de modo de fallo y efecto. Al aplicar la fase III de Lean Six Sigma se obtienen no solo los niveles de calibración de cada uno de los factores, sino los valores de los niveles óptimos de calibración. A medida que aumenta el valor de rating se obtiene la mejor condición de disminución del efecto de piel de naranja.

Tabla 2. Medición de piel de naranja: Arriba diseño Experimental I y abajo diseño Experimental II

Diseño Experimental I	Temperatura del horno (°C)			
	135		140	
Presión de aire (PSI)	Sólidos (%)			
	18	36	18	36
75	6,43	6,81	6,18	6,32
	6,44	6,82	6,19	6,30
	6,38	6,73	6,25	6,25
	6,41	6,69	6,22	6,27
	6,37	6,83	6,21	6,32
	6,52	6,70	6,21	6,43
85	6,51	6,71	6,17	6,42
	6,49	6,79	6,21	6,40
	6,51	6,68	6,19	6,39
	6,48	6,77	6,14	6,41
Diseño Experimental II	Temperatura del horno (°C)			
	130		135,36	
Presión de aire (PSI)	Sólidos (%)			
	36	40	36	40
85	6,79	6,80	6,78	6,82
	6,78	6,79	6,79	6,77
	6,81	6,85	6,79	6,84
	6,77	6,78	6,78	6,83
	6,78	6,83	6,81	6,82
	6,96	6,95	6,94	6,95
90	6,98	6,97	6,93	6,94
	6,99	6,96	6,95	6,96
	6,92	6,93	6,92	6,91
	6,99	6,98	6,93	6,93

### 3.2 Calibración de la cabina de aplicación pintura esmalte

En la Tabla 3 arriba, se obtienen del Minitab 16 los valores óptimos de factores que tienen efectos significativos sobre el efecto piel de naranja. Los resultados de la optimización en lo referente al rating máximo de piel de naranja que se puede obtener para las condiciones establecidas es de 6,73. Con los valores resultantes de optimización de cada factor, se procedió a realizar la corrida experimental II partiendo de los

niveles: cantidad de sólidos (36-40) %, temperatura del horno (130-135,36) °C, presión de aire (85-90) PSI. En la Tabla 2 abajo, se observa las mediciones de piel de naranja correspondientes al Diseño factorial II con un valor máximo de 6,99 rating. Es evidente que la interacción de los factores con la combinación experimental de sus niveles factoriales determina el máximo rating de piel de naranja para el diseño II. Se procedió a optimizar los factores del diseño experimental factorial II aplicando software Minitab 16 para un valor de piel de naranja de 6,80 rating, como se indica en la Tabla 3 abajo.

Se tiene evidencia a partir del diseño factorial II los niveles a los que se calibra: cantidad de sólidos (35-40) %, temperatura del horno (130-135,36) °C y presión de aire (85-90) PSI se indica en la Tabla 3 abajo.

**Tabla 3.** Optimización de los niveles factoriales: diseño experimental I arriba y diseño factorial II abajo.

Diseño experimental I				
Optimal		Temperatura	% Sólido	Presión
D	Hi	140	36	85
0,53714	Cur	[135,3598]	[36,9]	[85,0]
	Lo	135	18	75

<b>Piel de naranja</b>				
Maximum				
y= 6,7380				
d= 0,15867				
<b>Espesor</b>				
Targ: 117,0				
y= 116,8008				
d= 0,97670				
<b>Brillo</b>				
Targ: 95,0				
y= 95,0000				
d= 1,0000				

Diseño experimental II				
Optimal		Temperatura	% Sólido	Presión
D	Hi	135,36	40	90
0,06073	Cur	[132,4389]	[36,8566]	[85,0]
	Lo	130	35	85

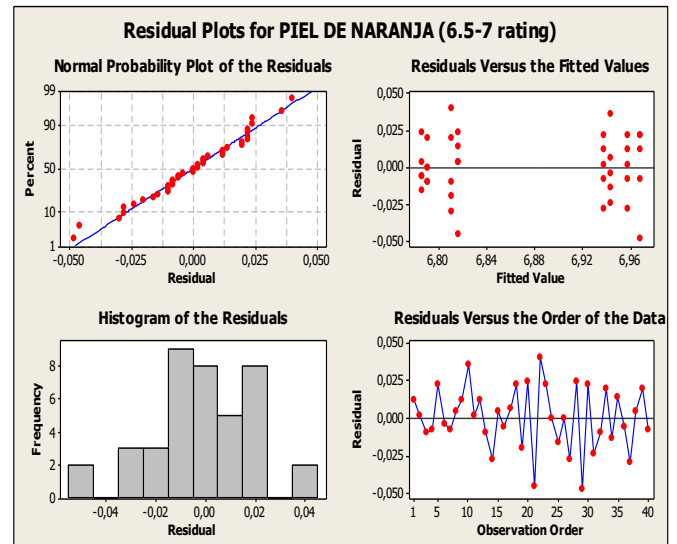
<b>Piel de naranja</b>				
Maximum				
y= 6,80042				
d= 0,05247				
<b>Espesor</b>				
Targ: 116,8010				
y= 132,8646				
d= 0,00436				
<b>Brillo</b>				
Targ: 95,0				
y= 95,0342				
d= 0,97959				

### 3.3 Resultado de análisis de variabilidad efecto piel de naranja

Se realiza el análisis de variabilidad con los resultados de piel de naranja del diseño experimental factorial II. La probabilidad de la temperatura del horno y el porcentaje de sólidos es 0,244, efectos no significativos. El efecto de la presión de aire con probabilidad 0,000 es significativo. El efecto debido al porcentaje de sólidos con presión de aire es significativo con probabilidad de 0,028. La presión de aire

explica el 93,49% de la variabilidad del efecto piel de naranja en las estructuras automotrices.

En la Fig. 6, se indica el análisis de variabilidad con los datos de rating que siguen una distribución normal. Los valores de los residuales indican valores mínimos con respecto al rango de valores aproximándose a 6,99 por la derecha. El rating obtenido es el máximo de acuerdo a las condiciones del diseño experimental. Los resultados de los residuales de rating tienen un comportamiento aleatorio de -0,50 a 0,50.



**Figura 6.** ANOVA piel de naranja. Distribución normal, residuales y puntos atípicos de rating.

### 3.4 Resultado de calibrar proceso de aplicación pintura esmalte

El efecto piel de naranja en las estructuras automotrices a medida que se acerca a valores cercanos a 7 disminuye y se obtiene la apariencia requerida de satisfacción al cliente. Para el proceso de aplicación de pintura se recomiendan los factores óptimos de aplicación de pintura esmalte: cantidad de sólidos 36,86%, temperatura del horno 132,4 °C y presión de aire de 85 PSI que corresponde al nivel bajo, como se indica en la Tabla 3.

Los resultados obtenidos de la optimización fueron a partir de dos corridas experimentales factoriales, partiendo del análisis multivariable que indica el punto de partida de las características críticas a calibrar. Las mediciones obtenidas de piel de naranja indican que la calibración se ha efectuado a las condiciones actuales del proceso de pintura esmalte. Aplicando la fase III de la metodología lean six sigma, las matrices indican las características críticas a optimizar con el programa minitab 16.

## 4. CONCLUSIONES

Al aplicar la fase III de la metodología Lean Six Sigma directamente en los procesos de mejora continua, se logra tener información cuantitativa para acercarse a la zona de optimización. El análisis multivariable es la base para obtener evidencia de las aproximaciones, como fue el caso del análisis piel de naranja con el valor máximo de rating de 6,73

del diseño experimental I, al valor de 6,99 rating del diseño experimental II, como se indica en la Tabla 2.

La característica crítica del proceso de aplicación de pintura esmalte de mayor efecto significativo es la presión de aire de la pistola. Al aplicar diseño experimental se determinó que los valores óptimos: presión de aire para el proceso es de 85 PSI en interacción con los factores porcentaje de sólidos 36,86% y temperatura del horno 132,4 °C dan un “rating” esperado de 6,80.

El conocer inicialmente los niveles factoriales basados en la experiencia y en la forma de ejecutar el proceso es fundamental para la calibración del proceso de pintura esmalte en los valores óptimos del porcentaje de sólidos, presión de aire y temperatura del horno, como se observa la matriz de la Tabla 1.

Con la aplicación de la fase analizar de la metodología Lean Six Sigma al mejoramiento de las características críticas del proceso de pintura, se definirán las variables que tienen mayor efecto significativo y que serán el foco de mejora. Se estandarizarán y se efectuarán análisis de los efectos significativos que impactan a la característica crítica piel de naranja de las estructuras automotrices.

### **AGRADECIMIENTO**

El presente estudio fue posible realizarlo gracias a GM-OBB Ecuador en lo referente al Sistema Global de Manufactura (GMS). A los editores por sus observaciones y recomendaciones para mejorar el presente trabajo.

### **REFERENCIAS**

Ansdell, D. (1999). Paint and surface coatings. *Metals and surface Engineering*, 411-491.

Bender, L. (2013). Automotive Paint. *Encyclopedia of Forensic Sciences*, 257-264.

General Motors Manual GCA, Gestión de Auditoría del Cliente, 2007.

Montgomery, D. (2005). *Design and Analysis of Experiment*, (6ta ed.). EEUU: Wiley.

*Sistema Global de Manufactura GMS*. General Motors-OBB., EEUU, 2006.

Reina, S. (2014). Estudio Experimental de la variación de la resistencia a la tracción del hilo de polipropileno. *Colim*. (1), 67-73.

Salvendy, G. (2001). *Handbook of Industrial Engineering*, (3ra ed.). EEUU: Wiley.

Taguchi, G., y Chowdhury, S. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook* (2nd ed.). Livonia, Michigan., EEUU: Wiley.