



Implementación del programa Seis Sigma para desarrollo sostenible en consumo de químicos en procesos litográficos*

Nestor Enrique Caicedo Solano**

Implementation of the Six Sigma program for the sustainable development of the consumption of chemicals in lithographic processes

Implementação do programa Seis Sigma para desenvolvimento sustentável em consumo de químicos em processos litográficos

RESUMEN

Introducción. Este artículo presenta el uso de la metodología DMAIC de programas seis sigmas de calidad para disminuir consumos de disolvente químico Lule 10, utilizado en procesos de limpieza de equipos especializados para litografía sobre hojalata. **Objetivo.** Utilizar la metodología DMAIC como modelo para el desarrollo sostenible para minimizar el impacto en sus componentes: medio ambiente, recurso humano y costos de producción, y mejorar los niveles de calidad del material impreso en la línea de producción litográfica. **Materiales y métodos.** El desarrollo de este trabajo estuvo enmarcado en la metodología DMAIC de los programas Seis Sigma, que alinean las actividades de definir, medir, analizar, mejorar y controlar el problema, buscando alternativas estadísticas y administrativas específicas que permitan obtener resultados satisfactorios acordes con los objetivos propuestos. **Resultados.** Como resultado se obtuvo una reducción significativa del consumo del disolvente, mejora en los procesos de limpieza de los equipos de la línea de producción, y minimización los costos de producción y de impacto en la salud de los operarios del área. **Conclusión.** El programa seis sigma se utiliza como una herramienta de tratamiento de problemas relacionados con el desarrollo sostenible y su pertinencia en la producción, haciéndola esbelta desde la perspectiva ambiental.

Palabras clave: Seis Sigma, calidad, medio ambiente, químicos, mejora continua.

* Artículo derivado del proyecto de investigación en curso "Lean Green Thinking: Procesos Esbeltos + Ambientes Sostenibles", Financiado por la Universidad Autónoma del Caribe. **Ingeniero industrial. Especialista en Ingeniería y Gestión de Calidad, Msc Ingeniería Industrial. Black Belt en Programas Seis Sigma. Profesor asociado – Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia. e-mail: nestor.caicedo@uac.edu.co

ABSTRACT

Introduction. This article introduces the use of the DMAIC methodology of the Six Sigma quality program to reduce the consumption of the Lule 10 chemical solvent, used to clean specialized equipment for lithography on tin. **Objective.** To use the DMAIC method as a model of sustainable development to minimize the impact on its components: environment, human resources and production costs, plus improving the quality levels of the material printed in the lithographic production line. **Materials and methods.** The development of this work was framed in the DMAIC methodology of Six Sigma programs that align activities to define measure, analyze, improve and control the problem, looking for statistics and specific administrative alternatives to obtain consistent satisfactory results with the proposed objectives. **Results.** A significant reduction of the consumption of the solvent was achieved. Also, there was an improvement in the cleaning of equipment in the production line, a reduction of the production costs and a good impact on the health of the operative staff. **Conclusion.** The Six Sigma program is used as a tool to treat problems related to sustainable development and its influence in the production, making it more agile from an environmental perspective.

Key words: Six Sigma, quality, environment, chemicals, continuous improvement.

RESUMO

Introdução. Este artigo apresenta o uso da metodologia DMAIC de programas seis sigmas de qualidade para diminuir consumos de solvente químico Lule 10, utilizado em processos de limpeza de equipes especializadas para litografia sobre latão. **Objetivo.** Utilizar a metodologia DMAIC como modelo para o desenvolvimento sustentável para minimizar o impacto em seus componentes: meio ambiente, recurso humano e custos de produção, e melhorar os níveis de qualidade do material impresso na linha de produção litográfica. **Materiais e métodos.** O desenvolvimento deste trabalho foi enquadrado na metodologia DMAIC de programas Seis Sigma que se alinham atividades para definir, medir, analisar, melhorar e controlar o problema, olhando para as estatísticas e alternativas administrativas específicas para obter resultados satisfatórios consistentes com os objetivos propostos. **Resultados.** Como resultado se obteve uma redução significativa do consumo do solvente, melhora nos processos de limpeza das equipes da linha de produção, e minimização os custos de produção e de impacto na saúde dos funcionários do área. **Conclusão.** O programa seis sigma se utiliza como uma ferramenta de tratamento de problemas relacionados com o desenvolvimento sustentável e sua pertinência na produção, fazendo-a esbelta desde a perspectiva ambiental.

Palavras importantes: Seis Sigma, qualidade, médio ambiente, químicos, melhora contínua

INTRODUCCIÓN

En las empresas de litografía se utilizan equipos especializados que con los cambios de corridas de producción deben ser limpiados con el fin de eliminar excesos de tinta que pueden llegar a generar productos no conformes. El uso de disolventes químicos nace de la necesidad de que estos equipos puedan ser limpiados en un nivel que permita producir sin no-conformidades luego de hacer cambios en colores de tintas de lotes de producción siguientes. El disolvente utilizado en este caso es el Lule 10. Los solventes orgánicos y sus residuos son considerados peligrosos por sus características de inflamabilidad, liposolubilidad y volatilidad, con liberación de vapores inflamables, tóxicos y explosivos (Sistema Ambiental del Distrito Capital, 1996).

La emisión al ambiente de vapores de algunos solventes orgánicos volátiles contribuye a la degradación de la capa de ozono, como es el caso del tetracloruro de carbono y el tricloroetano. Por otro lado, en presencia de NOx y luz solar actúan como precursores de la formación de ozono ambiental, el cual produce efectos nocivos sobre la salud de la población y sobre el crecimiento de los vegetales, interfiriendo en la actividad fotosintética y en el metabolismo general de las plantas (Ministerio de Medio Ambiente de Colombia, 1995). Al evaporarse rápidamente, se concentran en espacios confinados y son absorbidos por el ser humano a través de la piel y por inhalación. Debido a sus propiedades liposolubles, luego de ingresar al organismo se concentran en tejidos grasos, acumulándose hasta al-

canzar concentraciones que producen diversos efectos negativos para la salud, inmediatos o de largo plazo (Estatuto general de protección ambiental, 2004).

Por estas razones, se propone la utilización de la metodología DMAIC que en su definición sobre los programas seis sigma de calidad busca Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar procesos, productos o servicios que minimicen impactos negativos sobre los clientes (Bañuelas, Antony & Brace, 2005).

A diferencia de otras aplicaciones, en este caso el modelo DMAIC se muestra como una opción para la gestión ambiental y el desarrollo sostenible (Brady & Allen, 2006), que hace que los procesos de producción sean limpios, y minimice el impacto en tres factores importantes:

- La salud del recurso humano que está en contacto directa o indirectamente con el proceso litográfico y de limpieza de los equipos y, por ende, con el disolvente.
- El medio ambiente que se afecta por las características químicas del producto.
- Por los costos asociados a la reducción de los consumos del disolvente.

Por estas razones, los pasos del programa seis sigma finalizan con un impacto positivo en los componentes del desarrollo sostenible, obteniendo resultados que evidencian una mejora significativa de los procesos y su gestión de calidad (Bañuelas, Antony & Brace, 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de este trabajo estuvo enmarcado en la metodología DMAIC (Lowental, 2002), de los programas seis sigma, que alinean las actividades de definir, medir, analizar, mejorar y controlar el problema, y buscan alternativas estadísticas y administrativas específicas que permitan obtener resultados satisfactorios acordes con los objetivos propuestos (Antony, Kumar & Tiwari, 2005).

La metodología que se propuso en este sentido sigue descrita a continuación:

a) Iniciando con las primeras etapas del modelo DMAIC, definir y medir, se identificaron las variables que afectaban significativamente el alto consumo de este disolvente, reconociendo la caracterización de los procedimientos que la compañía tenía enmarcados en su sistema de gestión de calidad certificado para el uso del disolvente en las actividades de limpieza.

Estas actividades propias del proceso litográfico para la fabricación de envases de hojalata y sus indicadores se evidenciaron a través de la observación directa sobre los registros de los departamentos de producción, gestión ambiental, despacho, control de calidad y salud ocupacional.

La obtención de información del disolvente fue importante, y para ello se revisaron las fichas técnicas y hojas de seguridad del producto, con el fin de caracterizar su aplicación y manipulación dentro del proceso litográfico de la empresa, para adoptar métodos de trabajo adecuados, buscando la protección de la salud y del medio ambiente.

b) Luego se procedió al desarrollo de las siguientes fases: analizar y mejorar. En esta fase se evaluaron factores relevantes (Frings & Grant, 2005), se utilizó la técnica diagrama de Pareto para priorizarlos y luego evaluarlos estadísticamente por medio del diseño experimental. Luego, diseñando y ejecutando estrategias experimentales, se establecieron niveles de optimización de los factores, construyendo un modelo matemático representativo del consumo.

Por último se llegó a la fase controlar, donde se diseñó y documentó un plan (Pyzdek, 2003) de manejo del disolvente a partir de la evaluación del modelo matemático propuesto anteriormente, utilizando el software MINITAB® como herramienta informática de análisis de datos, soportado en pruebas de hipótesis que evidenciaron los cambios en los consumos y los gráficos de control de

consumos implementados en la empresa, así como también, un análisis de costo/beneficio a partir de la caracterización de los nuevos parámetros de manipulación y uso del disolvente.

Técnica de Pareto

Con el principio de Pareto se consideraron los factores que incidían en los consumos de disolvente, del cual se observa de los factores (falta de entrenamiento, capacidad de envases, tiempo de exposición y viscosidad de los recubrimientos) representa un 80 % sobre las razones de consumo de disolvente, por lo que si centramos el diseño del experimento en estos cuatro factores, podríamos reducirlo en un 80 % de las posibilidades. Esta información fue extraída del diseño experimental inicial, donde se excluyeron factores que no eran significativos ni generaban ruido al consumo del disolvente utilizado. El indicador de desempeño del disolvente se muestra en la tabla 1, donde se evidencia el alto consumo antes de generar el proyecto de mejora. Esta tabla evidencia el problema económico, ambiental y social que se deriva del consumo del disolvente, lo cual apunta a la pertinencia de la solución.

Diseño de experimento

De forma sistemática se diseñaron los experimentos que permitieron conocer los efectos sobre los consumos, representados como variable de respuesta. Para la ejecución del experimento, se codificaron los factores principales asociados a los consumos con sus niveles bajos y altos como -1 y 1, respectivamente, y se obtuvo un diseño 2k completamente aleatorizado, ilustrado con sus interacciones en el modelo de regresión obtenido, y como variable de respuesta, el consumo en galones de disolventes consumidos para las corridas experimentales (Montgomery, 2007). A saber:

- Viscosidades de los recubrimientos (A): bajas y altas (-1, 1).
- Entrenamiento del personal (B): no capacitado y capacitado. (-1, 1).
- Capacidad de envases (C): volumen de 3 y 5 galones. (-1, 1).
- Tiempo de exposición (D): nocturno y diurno (-1, 1).

El cálculo de la réplica generó 48 muestras, extraídas de las curvas características y los planes de las funciones de MINITAB®.

Ajuste factorial: Consumo frente a A; B; C; D

$R^2 = 79,08 \%$, $R^2 (\text{Pred.}) = 52,94 \%$, $R^2 (\text{Ajustado}) = 69,28 \%$

Luego de estos resultados se obtuvo el modelo reducido de la siguiente manera:

Obtención del modelo reducido

Dentro del diseño, es importante conocer los términos significativos y cuáles no, para el modelo matemático. Para esto se hicieron pruebas de hipótesis que determinaran esta condición, teniendo en cuenta que los datos pasaron por las respectivas pruebas de homocedasticidad y pruebas de bondad necesarias para ser procesados luego en la ejecución y posterior análisis del experimento.

Desde el análisis de varianza y el pareto de los efectos pudimos eliminar términos que no eran significativos y así obtener una reducción de nuestro modelo matemático. Desde el MINITAB® obtuvimos:

Ajuste factorial: Consumo vs. A; B; C; D

R-cuad. = 72,74 % R-cuad. (Pred.) = 62,63 % R-cuad. (Ajustado) = 68,75 %

El modelo matemático reducido:

$$Y = 3.5625 + 0.3542A - 0.2917B + 0.2708C + 0.1667BC + 0.1250BCD$$

De los efectos estandarizados, el factor D es de tipo no significativo con un alfa = 0.05; por lo tanto, se omite del modelo matemático.

RESULTADOS

Los resultados se validaron, de tal manera que se diseñó un plan de muestreo y se conservó distribución normal teniendo en cuenta los niveles bajos (-1) para cada factor e iteración, los cuales indican la influencia significativa en la minimización del consumo del disolvente. La tabla 1 ilustra los consumos antes de la mejora, obtenidos a través de dos réplicas.

Tabla 1. Datos de consumo según modelo matemático

OBSERVACIONES	CONSUMOS (GAL.)	CONSUMOS (GAL.)	
1	3,75	2,75	Suma
2	3,25	2,5	95
3	3,5	2,75	Promedio
4	2,75	3	2,9687
5	3	2,5	
6	3,5	3,5	
7	2,5	3,75	
8	3,75	3	
9	2,75	2,25	
10	2,25	2,5	
11	3,75	2,75	
12	2,5	2,5	
13	2,25	3,75	
14	2,5	3	
15	3	2,75	
16	3,25	3,5	

Fuente: Elaboración propia

Una vez tomadas dos réplicas de 16 datos cada una, se obtuvieron consumos de 3,2 a 3,5 galones.

Para la comprobación de disminución de los consumos, se procedió a plantear una prueba de hipótesis para verificar si los nuevos datos evidenciaban una mejora significativa sugerida por el diseño experimental desde los factores que afectan significativamente el consumo. Los datos y resultados de esta comparación se ilustran en la tabla 2.

Tabla 2. Prueba Z calculada desde Microsoft Excel®

Prueba z para medias de dos muestras		
	Consumos Antes	Consumos después
Media	3,625	2,96875
Varianza (conocida)	0,72	0,49
Observaciones	32	32
Diferencia hipotética de las medias	0	
z	3,374827819	
P(Z<=z) una cola	0,000369309	
Valor crítico de z (una cola)	1,644853627	
Valor crítico de z (dos colas)	0,000738619	
Valor crítico de z (dos colas)	1,959963985	

Fuente. Elaboración propia

A partir del análisis, con un nivel de confianza del 95 % no existía suficiencia estadística para aceptar (H_0); por lo tanto se podía comprobar que los consumos anteriores al proyecto eran evidentemente mayores antes de la mejora.

Plan de manejo para el consumo de disolvente

Representando de una forma gráfica la secuencia en que quedarían las actividades según el modelo matemático, se propuso un plan de manejo ilustrado en el flujograma de la figura 1, que ayuda a identificar claramente las actividades, a partir de la caracterización de los nuevos parámetros de manipulación y uso.

Se debe tener en cuenta que la capacidad de los envases no se menciona en el flujograma, dada la restricción física de los mismos donde se almacenan los disolventes (una política de la compañía no se podía modificar, corregir o alguna otra actividad relacionada con los envases).

3.2 Control estadístico para el proceso

Esta herramienta estadística fue propuesta para controlar el consumo de este disolvente pretendiendo cubrir los objetivos orientados al seguimiento y vigilancia del proceso, la reducción de la variación y los menores costos por consumo, a través del monitoreo de la característica definida como consumo del disolvente, (Besterfield, 2009).

De esta forma procedimos al cálculo de los límites de control superior e inferior para la media y rango de los datos nuevos obtenidos desde Microsoft Excel®, buscando ilustrar las diferencias de los consumos del disolvente antes y después de las mejoras (figuras 2 y 3).

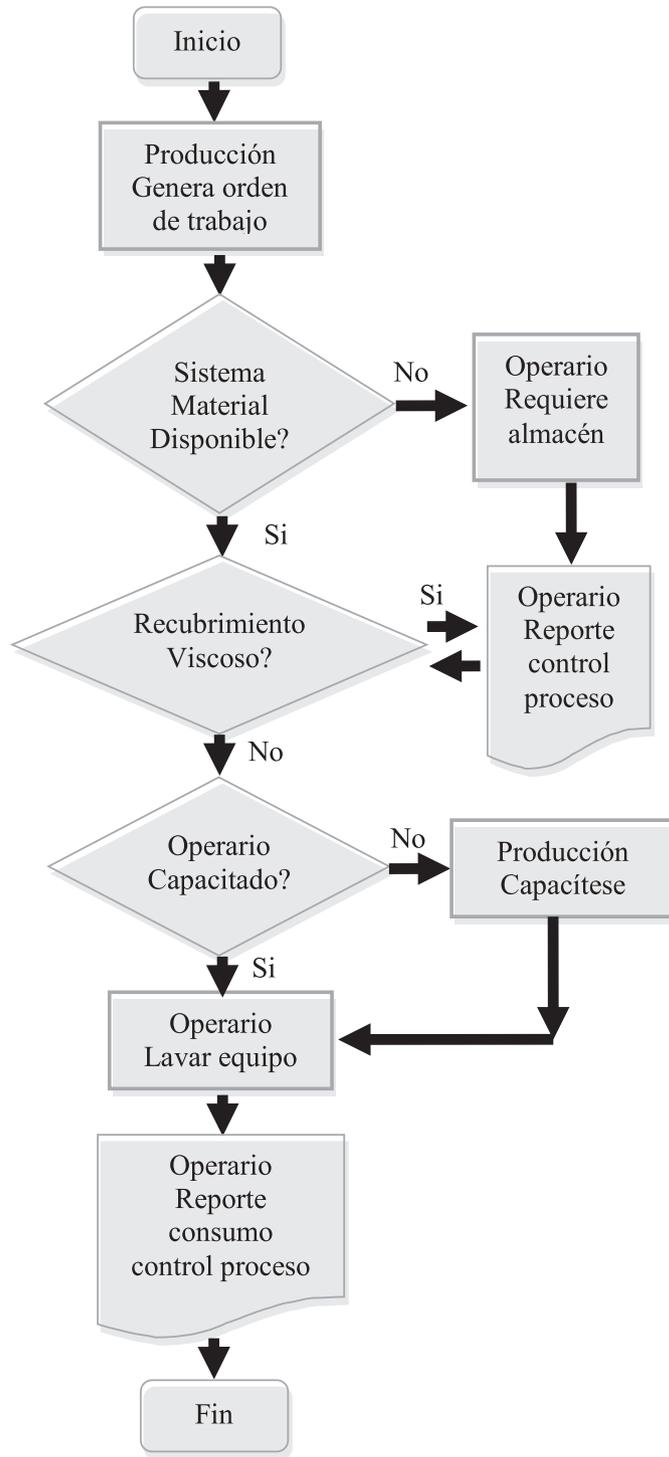


Figura 1. Flujograma para el consumo de disolvente

Fuente: Elaboración propia

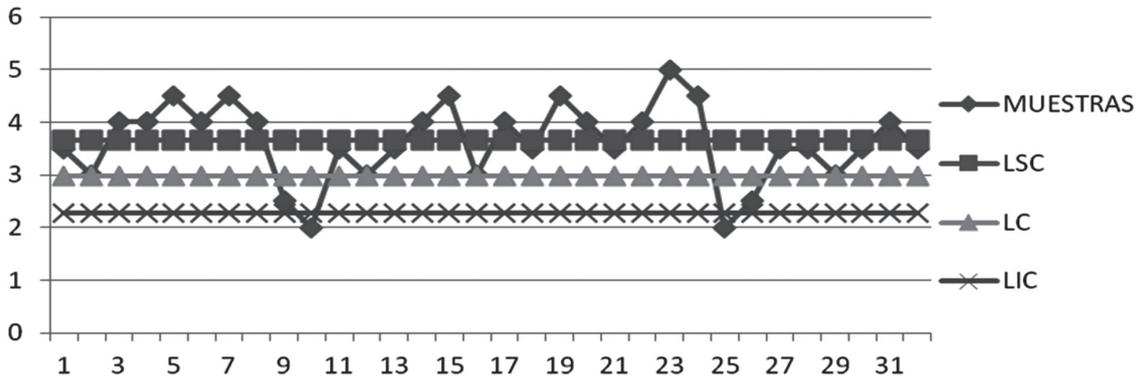


Figura 2. Gráfico de control para los datos antes de la mejora

Fuente: Elaboración propia

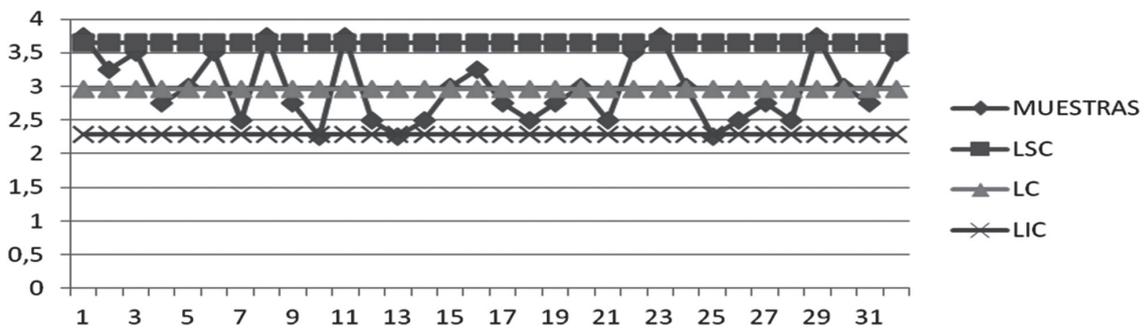


Figura 3. Gráfico de control para los datos después de la mejora

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se ilustra el cambio en el proceso de limpieza y consumo del disolvente, que pasó de una capacidad de procesos de $C_p = 0.38$ a un $C_p = 1.02$, teniendo en cuenta que los consumos máximos de la tolerancia fueron los calculados por el proceso de optimización a través del modelo matemático; este nuevo valor de capacidad de proceso indica una mejora en el cumplimiento de los nuevos parámetros de consumo del disolvente.

Análisis costo-beneficio

Dado que es una técnica importante dentro del ámbito de la teoría de la decisión, se determinó valorar la conveniencia de los cambios en términos económicos derivados de los costos y beneficios deseables e indispensables, los cuales se pueden ver en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3. Costos de producción consumo de disolvente

Costos de producción			
Lista de costos	Consumo pro/mes (2011)	Costo unitario(\$)	Costo total(\$)
Paros de producción	0,35 tambores	1,100,000	385,000
cambios de referencias	23,56 tambores	1,100,000	25,920,000
Mantenimiento inventario	24 tambores	165,000	165,000
TOTAL			26,470,000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Costo diferencia de consumo antes y después

Diferencia antes y después entre consumos y costos						
Factores	Consumos (GAL.)	Costo unitario (\$)	Costo total	Costo acumulado	%	%ACUDO.
Falta de entrenamiento	33	20,000	660,000	660,000	22,93	22,93
Capacidad de envase	10,56	20,000	211,200	871,200	19,1	42,03
Tiempo de exposición	40,36	20,000	807,200	1,678,400	18,69	60,72
Viscosidad	22,44	20,000	448,800	2,127,200	15,28	76,01
TOTAL	106,36	20,000	2,127,200		76	

Fuente: Elaboración propia.

Evidentemente existe un ahorro en los costos de consumo después de la mejora en una cantidad significativa de \$2 127 200/mes o \$25 526 400/año.

Tabla 5. Relación costo-beneficio

Costos de producto de calidad		Beneficios de producto de calidad	
Costos	Costo unitario/mes(\$)	Beneficios	Costo unitario/mes(\$)
Capacitación	375,000	capacitación	660,000
Tiempo Exposición	110,000	Tiempo exposición	807,200
Viscosidad recubrimiento	108,800	Viscosidad recubrimiento	448,800
Desechos (estopas)	87,000	Desechos (estopas)	2,500
No se reutilizan	21,600	No se reutilizan	21,600
Cuchillas	56,000	Cuchillas	56,000
Control consumo	108,800	Derrames	11,250
		Control de consumo	40,000
		Control consumo	108800
COSTO TOTAL	867200	BENEFICIO TOTAL	2,156,150

Si analizamos los cálculos de costo-beneficio, por cada peso gastado se obtiene un \$2,48 de retorno positivo.

CONCLUSIONES

1. El desarrollo del primer objetivo específico dio lugar a que se identificaran los factores que producen el alto consumo de este disolvente, por medio de la caracterización o acciones que suelen realizarse y ser aplicables a dicho proceso en función de las dos primeras fases, Definir y Medir, de la metodología propuesta.
2. Una vez obtenidos los factores causantes del alto consumo de este disolvente, se procedió al desarrollo de las siguientes fases Analizar y Mejorar, para el cumplimiento del segundo objetivo específico, utilizando herramientas como la gráfica de Pareto, que representó el grado de importancia o peso que tienen estos factores. Se observa cómo un 20 % de los factores (falta de entrenamiento, capacidad de envases, tiempo de exposición y viscosidad de los recubrimientos) representa un 80 % de los defectos por consumo de disolvente, por lo que si centráramos el diseño del experimento en estos cuatro factores, podríamos reducirlo en un 80 %.

Para el diseño y ejecución de estrategias, como todas las posibles combinaciones entre estos factores cada uno con dos niveles de significancia, se obtuvo la construcción de un modelo matemático que con el objetivo de minimizar el consumo de este disolvente, se logró pasar de 3.62 a 2.96 galones aproximadamente.

Se planteó una prueba de hipótesis donde se comprobó estadísticamente que los consumos después de la mejora realmente son menores que los de antes.

3. Luego de concluir que la mejora propuesta es confiable para la reducción del consumo se propuso un Flujograma de procesos para la manipulación y uso del disolvente.
4. Se logró demostrar que los datos anteriores el proceso se encuentran por fuera de los límites de control mientras que con los datos después de la mejora se demostró que estaban dentro de los límites, lo que significaba un control del consumo del disolvente para la limpieza de los equipos de producción.
5. Con el análisis costo-beneficio, se determinó la valoración y conveniencia en términos económicos, con una relación de \$2,48 de beneficio por cada \$1 invertido con un beneficio hasta de \$25,526,400 en el primer año.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía de Bogotá. (1996). *Acuerdo 19 de 1996 SIAC (Sistema Ambiental del Distrito Capital)*. Bogotá: La Alcaldía.

Alcaldía de Bogotá. (2004). *Estatuto General de Protección Ambiental del Distrito Capital*. Bogotá: La Alcaldía.

Antony, J.; Kumar, M. & Tiwari, M. (2005). An application of Six Sigma methodology to reduce the engine-overheating problem in an automotive company. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, 633-644.

Bañuelas, R.; Antony, J. & Brace, M. (2005). An Application of Six Sigma to Reduce Waste. *Quality & Reliability Engineering International*, 553-570

Besterfield, D. (2009). *Control de calidad*. Editorial Pearson.

Brady, J. & Allen T. (2006). Six Sigma Literature: A Review and Agenda for Future Research. *Quality and Reliability Engineering International*, 22, 335-367

Frings, G. & Grant, L. (2005). Who moved My Sigma. Effective Implementation of the Six Sigma Methodology to Hospitals. *Quality & Reliability Engineering International*, 31 1-328.

Lowenthal, Jeffrey N. (2002). Guía para la aplicación de un proyecto Seis Sigma. Fundación Confemetal.

Ministerio de Medio Ambiente de Colombia. (1995). Decreto 948 de 1995, Reglamento de protección y control de la calidad del aire. Bogotá D.C.: El Ministerio.

Montgomery, D. (2007). Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería. Editorial Limusa.

Pyzdek, T. (2003). *The Six Sigma Project Planner: A Step-by-Step Guide to Leading a Six Sigma Project Through DMAIC*. McGraw-Hill.