

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/268371020>

MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA MINIMIZACION DE DESPERDICIOS INDUSTRIALES: UNA APLICACIÓN

ARTICLE · JANUARY 2010

READS

39

5 AUTHORS, INCLUDING:



[Marisol Valencia Cárdenas](#)

National University of Colombia

19 PUBLICATIONS 7 CITATIONS

SEE PROFILE

MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA MINIMIZACIÓN DE DESPERDICIOS INDUSTRIALES: UNA APLICACIÓN.

Marisol Valencia Cárdenas **, Lissete Niño Rentarías *, Andrea Peña Camacho *, Natalia Sepúlveda
Castrillón* .

***Magister en Estadística Universidad Nacional de Colombia.*

***Docente, Universidad Pontificia Bolivariana*

Estudiantes, Universidad Pontificia Bolivariana

Recibido 26 Agosto 2010; aceptado 05 Diciembre 2010

Disponible en línea: 21 Diciembre 2010

Resumen: Actualmente, se ha visto la necesidad de integrar diferentes modelos de aplicación que ayuden a una empresa a mejorar continuamente sus procesos, mediante el manejo acertado de las variables que intervienen en dicho proceso, y de los recursos necesarios, buscando el mejoramiento de su productividad y competitividad. En este trabajo, se muestran dos metodologías para que la empresa Estampados J.A utilice alternativas de manejo eficiente de su proceso productivo, reduciendo los costos de los desperdicios industriales. La primera es un modelo de diseño experimental y la segunda, un modelo de programación lineal, a partir de los cuales se lograron encontrar los niveles óptimos con los cuales debe funcionar el proceso estudiado para la disminución de los desperdicios y se mostró que por medio de la herramienta de optimización es posible valorizar los costos que puede acarrear el proceso estudiado si se minimiza la generación de sus desperdicios.
Copyright © 2009 UPB.

Abstract: Nowadays it has been necessary to integrate different application models helping to a company to continually improve their processes through the successful management of both: the variables involved in this process as well as the resources required for it, looking for the improvement of productivity and competitiveness. In this work, two methodologies are provided to Estampados J.A, in order to have alternatives of efficient management of their productive process reducing costs of wastes. The first is an experimental design model and the second, a linear programming model, through which optimal levels were detected to reduce wastes of the productive process studied, and it was shown that costs valorization was possible using optimization tool when minimization wastes is done.

Keywords: Experimental Design, Linear Programming, industrial wastes, optimization.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de desperdicios industriales es necesario ya que existen empresas que normalmente no tienen una buena planeación y métodos de estimación de los recursos a utilizar en sus procesos, lo que ocasiona un uso irregular de estos y una reducción de su nivel de competitividad. El desperdicio industrial es cualquier ineficiencia en el uso de equipo, material, trabajo, o capital en cantidades que generan costos innecesarios en los procesos productivos ([Torres et al \(1999\)](#)).

La programación lineal es una herramienta útil para la optimización de los recursos ya que dependiendo de los objetivos que se trace una empresa, proporciona soluciones eficientes que podrían ayudar a la toma de decisiones, y al logro de un buen funcionamiento en el sistema estudiado ([Sala Garrido, R. 1993](#)). Esto permite aumentar la eficiencia, calidad y productividad de todos aquellos procesos que son parte vital de una empresa.

En este trabajo, se pretende hacer un estudio sobre la minimización de desperdicios industriales aplicado al proceso de estampación en plástico de la empresa Estampados J.A., utilizando el análisis y diseño de experimentos y un modelo de programación lineal. Estas metodologías buscan determinar la combinación óptima de cantidad de pintura y cantidad de disolvente que minimiza el costo del desperdicio.

Así mismo, se utiliza un análisis de sensibilidad que permite dar a conocer los cambios permisibles de los diferentes parámetros de la solución óptima para la toma de decisiones, y que además, la empresa pueda tener un mejor control sobre la asignación, distribución y manejo de los recursos, para evitar sobrecostos en la compra de materiales y de esta manera tener un buen aprovechamiento de los mismos, aumentando la competitividad y productividad de la compañía.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen metodologías para el tratamiento de desperdicios en la industria, de manera que puedan disminuirse, así como el costo que ellos acarrearán. Una de ellas es la propuesta realizada por trabajo de [Torres Formoso et al \(1999\)](#), cuyo propósito fue establecer procedimientos de control de desperdicios como parte cotidiana de la tarea de gestión. Se usa un sistema de aprendizaje, se enfatiza la transparencia, y se emplean técnicas cualitativas y cuantitativas de recolección de datos, esto facilita a la empresa un mejoramiento continuo, en la medida en que provee a sus trabajadores de capacitación sobre la gestión eficiente de sus labores.

Igualmente, [Acevedo Lizarazo et al \(2003\)](#), muestran un modelo de programación lineal para la disminución de desperdicios y [Arbib, C. et al \(2002\)](#), utilizan un modelo matemático basado en programación lineal el cual fue desarrollado en un problema de corte y reutilización aplicado a un problema real en la fabricación de partes de automóviles. Además de la existencia de estos trabajos, en otros como el de [Jenkins, L. \(1982\)](#), se muestran aplicaciones de técnicas heurísticas y procedimientos computacionales para la realización de análisis paramétricos usando Programación Lineal Entera Mixta (MILP) en recuperación de residuos sólidos. Adicionalmente, existen modelos propuestos para su optimización, como el algoritmo propuesto por [Rivero, Gómez y Flores, A \(2005\)](#), que usa programación dinámica para minimizar el desperdicio de materiales.

Lo anterior, muestra un horizonte de investigación hacia la optimización de procesos disminuyendo desperdicios.

En el caso estudiado en este trabajo, se observó que en Estampados J.A. se está incurriendo en costos innecesarios en el manejo ineficiente de los recursos de pintura y disolvente que pueden afectar la rentabilidad y solvencia de esta al no hacer un control adecuado de los desperdicios, pues no contaba con ninguna metodología de control de los mismos, o mediciones previas de materia prima para disminuirlos. Además, es de especial interés el proceso de estampado de plástico, donde los desperdicios se conforman por la mezcla de disolvente y de pintura.

De esta manera, se ve la necesidad de implementar una metodología validada a través de una técnica estadística como es el diseño experimental y cuyo resultado sea además mejorado al utilizar un modelo de apoyo para la toma de decisiones, como es la programación lineal dirigida a la disminución de desperdicios en esta empresa.

A continuación se describirán las metodologías utilizadas.

3. METODOLOGIA

3.1. Diseño experimental.

La metodología propuesta por [Montgomery, \(2000\)](#), puede resumirse en los siguientes aspectos para la planeación de un diseño experimental.

Planeación del diseño experimental: Se trata de encontrar los niveles adecuados de los factores que intervienen en el proceso de estampado para disminuir el desperdicio de pintura del proceso de estampado de 1 producto.

Elección de factores y niveles: estos fueron determinados por medio de entrevistas y una encuesta realizada a los encargados del proceso, a partir de los cuales, se determinaron los siguientes:

Factor 1: Cantidad de pintura. Niveles: 40 ml, 60 ml

Factor 2: Cantidad de disolvente. Niveles: 10 ml, 15 ml.

Factor 3: Operario. Niveles: Operario 1, Operario 2, Operario 3.

Factor de bloqueo: Turno . Niveles :

Turno 1: Mañana (7:00 am – 1:00 pm)

Turno 2: Tarde (1:30 pm – 5:00 pm)

El modelo de efectos fijos es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \lambda_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} : Variable respuesta desperdicio de material (vol, en ml).

α_i : i-ésimo efecto del factor Pintura

β_j : j-ésimo efecto del factor Disolvente

γ_k : k-ésimo efecto del factor Operario

λ_l : l-ésimo efecto del bloque turno

$(\alpha\beta)_{ij}$: ij-ésimo efecto de interacción entre Pintura y Disolvente.

$(\alpha\gamma)_{ik}$: ik-ésimo efecto de interacción entre Pintura y Operario.

$(\beta\gamma)_{jk}$: jk-ésimo efecto de interacción entre Disolvente y Operario.

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$: ijk-ésimo efecto de interacción entre Pintura, Disolvente y Operario.

Posterior a estos planteamientos se realizó la recolección de los datos y se procede con el análisis utilizando el programa R¹.

La recomendación de los mejores niveles, serán aquellos que produzcan menor cantidad de desperdicios medidos por vez que se realiza el estampado con las cantidades fijas de pintura y disolvente por corrida experimental.

Los mejores niveles encontrados servirán como base para determinar unos parámetros requeridos en el modelo de programación lineal que se establece a continuación.

3.2. Programación lineal.

El modelo propuesto consiste en la minimización de los desperdicios industriales generados en el proceso de estampación de un producto plástico en la empresa.

Por ello, la forma del modelo de programación lineal será como se expresa a continuación:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^k a_j x_j \quad (1)$$

Donde Z representa el costo del desperdicio de disolvente (isoforona) y pintura PVC en el proceso de estampación de plástico por vez que se hace este, cada una de las cuales emplean 50 ml en la mezcla para hacer el estampado, considerando que los coeficientes a_j son los costos del desperdicio, y x_j corresponden a las cantidades de desperdicio de disolvente y de pintura, con $i=d$.

Las restricciones del problema se definirán según la composición del desperdicio respondiendo a las preguntas:

- Cuánto debe ser el desperdicio máximo de disolvente? Y cuánto de pintura?
- Cuánta es la producción máxima en un día? Esto depende de las unidades producidas en un día.

Para realizar las restricciones se tomará en cuenta el nivel óptimo encontrado en el diseño experimental, a partir de este, se determinará el costo del desperdicio mínimo z como la suma producto entre el valor por cantidad y la cantidad x_i .

Este planteamiento será mostrado en la sección de resultados.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados del diseño experimental

En la [Figura 1](#), se muestra el gráfico de interacción entre estos los factores Operario, pintura y disolvente.

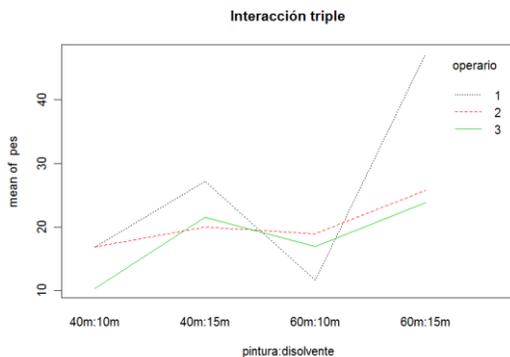


Fig. 1. Interacción triple entre cantidad de pintura, disolvente y operario.

Según esta figura, se aprecia una aparente interacción entre estos 3 factores, por los cambios evidentes en las diferencias entre medias de un nivel a otro de la combinación pintura con disolvente, lo cual puede mostrar que el modelo de diseño multifactorial a emplear puede ser

adecuado para explicar la cantidad de mezcla entre pintura y disolvente desperdiciados.

Posterior a esta exploración fue estimado entonces el modelo de diseño experimental donde la variable respuesta es el volumen de desperdicio por vez que se realiza la plancha de estampación, considerando los factores mencionados previamente.

La estimación del modelo ANOVA, con el programa R¹ arrojó los resultados siguientes.

Tabla 1. Tabla de Análisis de varianza del diseño experimental.

Fuente de variación	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
(operario)	2	483.16	241.58	5.34	0.01
Pintura	1	333.91	333.91	7.38	0.01
Disolvente	1	1820.4	1820.4	40.22	0
(operario):disolvente	2	712.61	356.3	7.87	0.001
pintura:disolvente	1	200.9	200.9	4.44	0.042
(operario):pintura	2	28.53	14.27	0.32	0.7
(operario):pin:disol	2	466.08	233.04	5.15	0.01
Residuals	36	1629.37	45.26		

Hallazgos

La significancia de las interacciones de los diferentes efectos ($vp < 0.05$) indica que la incidencia del operario sobre la variable respuesta desperdicio se ve afectada por la cantidad de disolvente utilizada, tal como sucede con la mezcla de pintura y disolvente. Lo anterior nos permite tener un mejor panorama del proceso de estampado y así ejercer un mejor control sobre el mismo.

Considerando además que la interacción triple es significativa ($vp = 0.01 < 0.05$), los niveles a recomendar van en el uso de un adecuado nivel de disolvente y pintura, pero con el mejor método del operario.

Según el análisis de medias y efectos de la interacción triple que resultó significativa, se demuestra que los niveles recomendables son el trabajo de los operarios 2 y 3 con cantidad de pintura 40 ml usando 10 ml de disolvente, siendo muy diferentes al operario 1. Este último produce menos desperdicio si usa 40 ml de pintura y 10 ó 15ml de disolvente, por tener igualdad de medias de acuerdo a la prueba de Tukey, pero produce más que los otros operarios cuando usan 15 ml. Esto sugiere que su método de mezclado y

¹ Project. Rgui. <Disponible en <http://www.cran.r-project.org>.>

estampado puede ser diferente de los otros operarios para estos niveles, lo que produce diferencias en los desperdicios.

Adicionalmente, con una potencia de 96.79%, se puede decir que se obtuvo un modelo confiable y con un tamaño de muestra y réplicas adecuado.

Por medio de las pruebas analíticas de Shapiro, con un $vp=0.513$, y Bartlett, con $vp=0.27$ se encontró normalidad de residuales y varianza constante, así como no correlación entre los residuales con la de Durbin Watson ($vp=0.24$). Este modelo de diseño experimental genera entonces una adecuada base para realizar inferencias con relación a los niveles que generan menor desperdicio medio por estampación realizada.

Valor medio en niveles óptimos que minimizan el desperdicio.

Son en total 12 las corridas en cada interacción de pintura con disolvente tomadas en el diseño, a partir de allí, el valor total de desperdicio en los niveles de 40 ml de pintura y 10 de disolvente, es de 175.9 ml, luego el promedio es de 14.66 ml en 50 ml, que representa un porcentaje de 29.32%. Es decir, cada que emplean 50 ml para la estampación, este es el promedio desperdiciado.

4.2. Resultados del modelo de programación lineal.

Inicialmente se realizará el planteamiento del problema en el contexto de la empresa, mostrando la forma del modelo de programación lineal de minimización propuesta. Posteriormente se muestran los resultados encontrados.

Planteamiento del problema.

z : costo del desperdicio de disolvente (isoforona) y pintura PVC en el proceso de estampación de plástico.

x_p : cantidad de pintura desperdiciada en el proceso de estampación.

x_d : cantidad de disolvente desperdiciado en el proceso de estampación.

Se tiene que:

- El costo del disolvente es de \$30.000 (una unidad tiene aproximadamente 2173ml) por tanto el costo unitario es de \$13.8/ml
- El costo de la pintura es de \$52.000 (una unidad tiene aproximadamente 746ml) por tanto el costo unitario es de \$69.7/ml

Función objetivo:

$$\text{Minimizar } z = \$13.8x_d + \$69.7x_p$$

La restricción (1) se determinó según el promedio de desperdicio, ya la empresa actualmente se encuentra desperdiciando más material del mínimo obtenido:

$$x_d + x_p \geq 14.66 \quad (1)$$

La restricción (2) se refiere a la proporción del componente de la mezcla: 40 ml son un 80% y 10 son un 20%.

$$x_p \leq 0.8 (x_d + x_p)$$

$$0.8 x_d - 0.2 x_p \geq 0 \quad (2)$$

La restricción (3) fue según la producción máxima por día = 24000 ud/día.

$$\text{Desperdicio promedio de pintura} = (175.9\text{ml}) * 80\% = 140.72 \text{ ml/día.}$$

$$\text{Desperdicio promedio de Disolvente} = (175.9\text{ml}) * 20\% = 35.18 \text{ ml/día.}$$

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ unidades/día}}{\text{Desperdicio Prom. Pintura}} = \frac{24.000 \text{ ud/día}}{140.72 \text{ ml/día}}$$

$$= 170.55 \text{ ud/ml}$$

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ unidades/día}}{\text{Desp. Prom. Disolvente}} = \frac{24.000 \text{ ud/día}}{35.18 \text{ ml/día}}$$

$$= 682.21 \text{ ud/ml}$$

$$\text{Luego, } 682.21 x_d + 170.55 x_p \leq 24.000 \quad (3)$$

Planteamiento final del modelo

$$\text{Minimizar } z = \$13.8x_d + \$69.7x_p$$

Sujeto a:

$$x_d + x_p \geq 14.66$$

$$0.8x_d - 0.2x_p \geq 0$$

$$682.21x_d + 170.55x_p \leq 24000$$

$$x_d, x_p \geq 0.$$

Solución

Con el uso de la versión libre de Winqsb, se obtuvo que la función objetivo resultante es de \$857.9 por ml desperdiciado por vez, con una cantidad de disolvente de 2.93 ml y de pintura de 11.73 ml aproximadamente, para este producto, (ver [Tabla 2](#)), esto es, cada vez que se emplean 50 ml, estas son las medidas medias de desperdicio en el nivel óptimo que puede tener el proceso actualmente.

Tabla 2. Solución óptima para la minimización de desperdicios.

Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
X1	2.9320	13.8000	40.4616	0	basic	-278.8000	69.7000
X2	11.7280	69.7000	817.4415	0	basic	13.8000	M
Objective	Function	(Min.) =	857.9031				
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
C1	14.6600	>=	14.6600	0	58.5200	0	87.9507
C2	0.0000	<=	0	0	-55.9000	-2.9320	11.7280
C3	4,000.4210	<=	24,000.0000	19,999.5800	0	4,000.4200	M

Agregando un análisis de sensibilidad del modelo de programación lineal propuesto, se concluye lo siguiente:

1. De acuerdo a los intervalos de sensibilidad el costo máximo de disolvente es de \$69.7, por encima de este, se aumenta el mínimo costo generado.
2. El costo mínimo por mililitro de pintura debería ser de \$13.8, si la empresa paga un valor de costo por mililitro de pintura por debajo de este, el costo disminuye notablemente, sin embargo se presentaría la situación en el que la cantidad de disolvente es cero, por tanto debe conservarse en este límite inferior ([Tabla 3](#)).

Tabla 3. Solución a partir del cambio de C2.

Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
X1	0	13.8000	0	1.8000	at bound	12.0000	M
X2	14.6600	12.0000	175.9200	0	basic	0	13.8000
Objective	Function	(Min.) =	175.9200				
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
C1	14.6600	>=	14.6600	0	12.0000	0	140.7212
C2	-2.9320	<=	0	2.9320	0	-2.9320	M
C3	2,500.2630	<=	24,000.0000	21,499.7400	0	2,500.2640	M

3. Adicionalmente, si se aumenta en una unidad el recurso b1 (desperdicio mínimo inherente al proceso), el costo mínimo de desperdicio se incrementa en \$58.52 esta relación se presenta siempre y cuando el desperdicio mínimo del proceso no exceda 87.9507 ml. Es decir, se espera puedan mantener el mínimo valor del recurso b1 en 14.66 por vez, para evitar mayores aumentos de del costo desperdiciado.

4.3. Propuesta de mejoramiento en los niveles de desperdicios.

Se propone realizar un cambio en la restricción (1), según el promedio de desperdicio máximo admitido, sugiriendo que el promedio desperdiciado no pase del 20% de los 50 ml.

$$x_d + x_p \leq 10 \quad (1)$$

El desperdicio mínimo debería ser 0, sin embargo, no es la realidad. Por ello se propone una restricción más, considerando que el mínimo desperdicio sea del 10% y no del 29.32% actual, sobre los 50 ml.

$$x_d + x_p \geq 5 \quad (2)$$

La última restricción permanece igual, quedando el modelo final propuesto de la siguiente forma:

Minimizar $z = \$13.8x_d + \$69.7x_p$

Sujeto a:

$$x_d + x_p \leq 10$$

$$x_d + x_p \geq 5$$

$$0.8x_d - 0.2x_p \geq 0$$

$$682.21x_d + 170.55x_p \leq 24000$$

$$x_d, x_p \geq 0.$$

La solución con Winqsb queda según se observa en la [Tabla 4](#).

Tabla 4. Solución a partir del cambio de C2.

Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
X1	2,0000	13,8000	27,6000	0	basic	-278,8000	69,7000
X2	8,0000	69,7000	557,6000	0	basic	13,8000	M
Objective	Function	(Max.) =	585,2000				
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
C1	10,0000	<=	10,0000	0	58,5200	5,0000	87,9501
C2	10,0000	>=	5,0000	5,0000	0	-M	10,0000
C3	0	>=	0	0	-55,9000	-2,0000	8,0000
C4	2,728,8200	<=	24,000,0000	21,271,1800	0	2,728,8200	M

De la [Tabla 4](#) se observa que la solución mejora, pues el costo disminuye a \$585.2 por ml, lo cual sugiere a la empresa una estrategia administrativa que muestra las ventajas de disminuir el valor del desperdicio entre un 10% y un 20% de los mililitros totales empleados (en este caso 50 ml). La cantidad de disolvente media a desperdiciar de los 50 ml no debería ser mayor a 2 ml y de pintura, 8 ml, para lograr este objetivo de minimización de costos.

5. CONCLUSIONES

La empresa debe optar por modificar la proporción de pintura y disolvente a usar, de manera que en la cantidad final de desperdicio, exista una mayor diferencia entre dichos componentes de la mezcla, tratando de llevar el desperdicio de pintura a una menor cantidad, ya que es el costo más alto por ml. Lo cual es reforzado al afirmar que el costo de la pintura puede aumentar en más de \$13.8 y hasta un máximo de \$69.7 y el costo de desperdicio seguirá siendo el más bajo, aspectos que sugiere que deben economizar un poco más en el manejo de la pintura.

Estampados J.A, durante la realización de sus procesos, debe evitar que su desperdicio sea mayor a 14.66 ml de mezcla ya que si dicho desperdicio aumentara, el costo mínimo de desperdicio se incrementaría en \$58.52, lo cual se debe evitar.

El diseño experimental utilizado sirvió a la empresa para implementar un estándar de su proceso de estampado, midiendo el volumen de pintura y disolvente por vez, para tener un mejor control de su materia prima que permita disminuir los desperdicios que generaban sobrecostos innecesarios. Los resultados de este modelo son

fáciles de implementar si se controlan adecuadamente los niveles de funcionamiento, y además, repetir el análisis posterior sobre el proceso estudiado, proporciona una herramienta importante y ágil para la mejora de la calidad del mismo.

El modelo de optimización propuesto proporciona a la empresa una meta de disminución de desperdicios, pues el costo disminuye a \$585.2 por ml, lo que muestra que si logran la meta de dejar el desperdicio entre un 10% y un 20% de los mililitros totales empleados (en este caso 50 ml), optimizan aún más el costo, ayudando a la mejora productiva.

6. DISCUSIÓN

Sobre la producción diaria, si la empresa decidiera aumentarla, esta seguiría obteniendo el mínimo costo posible de desperdicio, el costo se ve afectado principalmente por los valores de costos promedio, así como el mínimo desperdicio en la estampación por producto.

Las herramientas proporcionadas son útiles para la toma de decisiones en cuanto a que permiten controlar el proceso optimizándolo con los niveles que son encontrados para buscar este objetivo.

Se recomienda a la empresa diseñar otros modelos similares para los demás productos, y generar el valor total de desperdicio, para que tenga una herramienta que controle estas cantidades mejorando sus procesos productivos. Para ello es importante una adecuada capacitación en el uso del diseño experimental y programación lineal a los encargados de la administración de calidad de dichos procesos.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Estampados J.A. por proporcionar tiempo, recursos, y facilitar la toma de datos para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Acevedo Lizarazo y otros (2003). Modelo para la programación de operaciones en la fabricación de cajas de cartón corrugado. Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte, 13. p 24:40.
- Montgomery, D.C. (2005) Análisis y Diseño de experimentos. 5ª edición, Wiley.
- Rivero, F. J. Gómez, E. F, (2005). Optimización de materiales mediante patrones de corte eficiente en la industria de la construcción. Facultad Ingeniería Civil Universidad la Salle.
- Sala Garrido, R. (1993). Programación Lineal: Metodología y problemas. Editorial Tebar.
- Torres Formoso C., et al (1999). Method for Waste Control in Building Industry. Proceedings Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Berkeley, California, USA, 26-28 July.

SOBRE LOS AUTORES

Marisol Valencia

Profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Magister en Estadística, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Lissete Niño, Andrea Peña, Natalia Sepúlveda

Estudiantes Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
