



## DISEÑO ROBUSTO Y MODELOS DE REGRESIÓN LOGÍSTICA EN LA MEJORA DE CALIDAD DE SUELA DE POLIURETANO

Armando Mares-Castro<sup>ab</sup>, Jorge Domínguez-Domínguez<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Universidad Tecnológica de León, León, Gto., amares@utleon.edu.mx

<sup>b</sup>Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, León, Gto., amares.picyt@ciatec.edu.mx

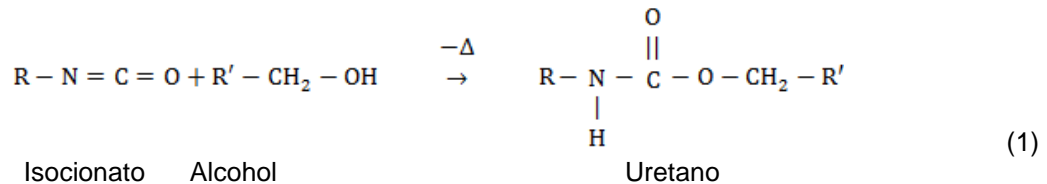
<sup>c</sup>Centro de Investigación en Matemáticas, Unidad Aguascalientes, jorge@cimat.mx

### RESUMEN

En el proceso de fabricación de suelas de poliuretano se presentan una serie de defectos de tipo cualitativo, los cuales pueden representar una pérdida económica importante para la empresa. Con el fin de mejorar la calidad del producto se realizó un experimento en el contexto del Diseño Robusto de Parámetros con la característica de que la variable de respuesta analizada es de tipo binaria (la clasificación pasa- no pasa que usualmente realizan los inspectores en base a criterios de calidad predefinidos). El esquema experimental con respuesta binaria permite el uso de modelos de regresión logística con el fin de cumplir con los supuestos clásicos en los modelos de regresión. Aunado a lo anterior, se proponen esquemas de optimización del tipo no lineal con los cuales se puede obtener la mejor solución para los niveles en los parámetros (variables), que tienen efecto importante en la respuesta cualitativa. La metodología operativa propuesta permitió la reducción del porcentaje de defectuosos en un 20% representando un ahorro económico importante. Además de una mejor comprensión del proceso por parte del personal involucrado mediante la implementación de estas herramientas de calidad.

### 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación de suelas de poliuretano se lleva a cabo en máquinas giratorias con 60 moldes en las cuales se realiza un vaciado con la mezcla de componentes de Isocianato líquido con componentes de resinas de Polioli líquidas. Además de los componentes mencionados, se adiciona un componente que da el color material. La reacción formadora de polímero poliuretano que ocurre entre un isocianato y un alcohol se de la siguiente forma (Ec. 1):



El caso de estudio que se presenta es el modelo de suela "Ucrania" el cual ha presenta una cantidad importante de piezas defectuosas desde su introducción. Para remarcar el impacto de la falla, se analizaron los datos de producción en un periodo de 6 meses en el cual se produjeron 47,872 piezas, de las cuales 20,858 fueron defectuosas es decir, el 43.57% de la producción fueron defectuosos lo cual a un costo de \$74.00 por pieza representaron pérdidas aproximadas de un millón y medio de pesos.



El proceso contempla un factor de ruido en la temperatura ambiental que se tiene en el turno matutino y el vespertino. La variable de respuesta es binaria ya que se tiene una clasificación de la suela en defectuosa o no defectuosa por parte de los inspectores de calidad en base a criterios predefinidos. Debido a esta situación se contempla el uso de los métodos de ingeniería de calidad en el marco del Diseño Robusto de Parámetros, lo que nos permitirá realizar diseño de experimentos con el fin de hacer el proceso más eficiente, mejorar la calidad y disminuir el costo. Robinson et. al. [1] hacen una revisión para aplicar el diseño DRP.

La metodología de superficie de respuesta (MSR), es una técnica que se aplica en el diseño experimental para optimizar un proceso. La construcción de modelos bajo la MSR requiere que la respuesta tenga una distribución de probabilidad normal. Una de las áreas de gran interés es cuando Este supuesto no se cumple, en particular para el problema de la fabricación de suelas, la variable aleatoria de respuesta tiene una distribución Bernoulli o binomial. Ante este escenario será oportuno recurrir a los modelos lineales generalizados (MLG), una variedad de casos en esta dirección se pueden consultar en Hamada y Nelder [2], Myers and Montgomery [3] y Myers, et. al. [4].

La finalidad de este trabajo es desarrollar la metodología para construir el modelo de superficie de respuesta para la respuesta binomial en el proceso de fabricación de las suelas de poliuretano en el contexto del diseño robusto y modelos lineales generalizados. Una vez que se realizó el diseño, se realizó el análisis estadístico y se indican las mejoras que se encontraron en el proceso.

## 2. METODOLOGÍA

La ubicación principal de los defectos resultantes en el proceso de elaboración de la suela de poliuretano se muestra en la Figura 1, ésta es muy importante ya que representa la vista final del producto.



Figura 1: Ubicación de los defectos en la suela.

A partir de estudios previos sobre el proceso, se observó que ocho factores tienen un efecto importante. Los factores y sus niveles son mostrados en la tabla 1

Tabla 1. Factores de control y ruido para el caso de estudio

	Bajo	Alto	
Presión del aire	0.5 Bar	1 Bar	Control
Tiempo de vaciado (Caudal)	55 grs/seg	70 grs/seg	Control
Áltura del Molde	6.5-15 cms	5-14 cms	Control
Carrera	110-70	80-90	Control
Razón Poliul/ Isocionato	0.9	0.92	Control
Temperatura del Molde	36°C	45°C	Control
Presión del aire sobre flujo	1.8 Bar	2 Bar	Control
Temperatura Ambiente	22°C	33°C	Ruido



Los factores señalados son cuantitativos. Algunos de éstos son regulados por el operario desde el tablero de control, tales como: Tiempo de vaciado del líquido (caudal), Carrera, Razón Polioli/ Isocionato, Temperatura del Molde. La presión del aire y presión del aire sobre el flujo son parte del proceso de pintado. La altura del molde se puede ajustar de forma manual en cada molde. El factor de ruido es la temperatura ambiental.

El plan que se propone es construir el modelo, y a partir obtener los modelos de respuesta para la Media y la Varianza. Con estos modelos, la meta será obtener la mejor combinación del nivel de cada factor con el fin de que el proceso produzca el menor número de defectos.

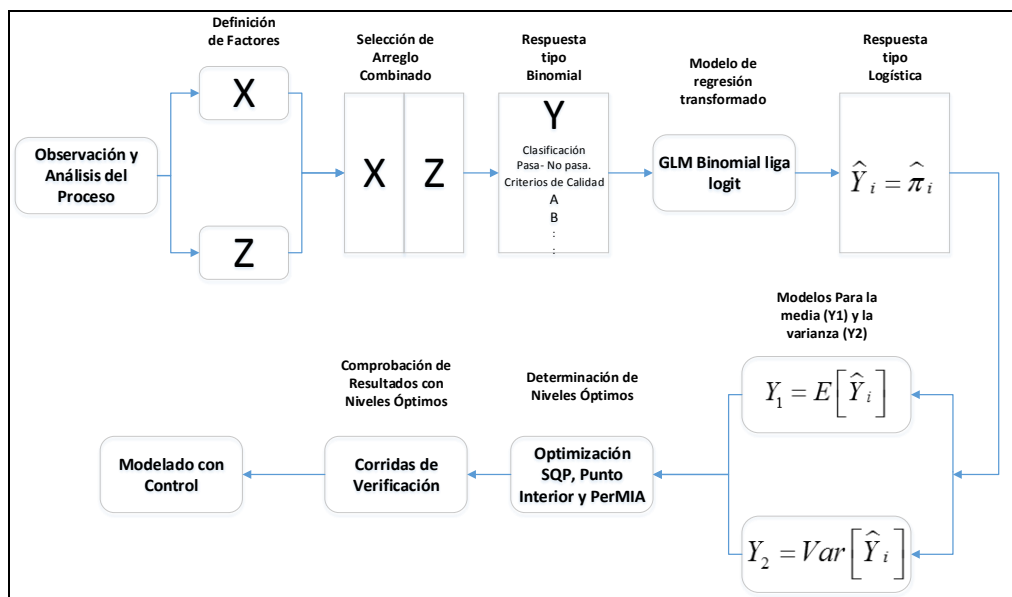


Figure 2: Metodología operativa

### 3. PARTE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

El modelo de regresión se obtuvo con el software Statgraphics Centurión. Se agregan las columnas de las interacciones deseadas al arreglo ortogonal  $2_{IV}^{8-4}$ , los estimados del modelo se obtienen por el método de máxima verosimilitud.

Tabla 2: Modelo de regresión estimado reducido

Parámetro	Estimado	Error	
		Estándar	Razón de Momios Estimada
CONSTANTE	-0.953217	0.0385211	
Z1	-0.190845	0.0380451	0.82626
X3	-0.145302	0.0384132	0.864761
X4	-0.221633	0.0375987	0.801209
X5	-0.185119	0.0380134	0.831005
X7	-0.341925	0.0380342	0.710402
X6	-0.103138	0.0374876	0.902003
X4*X7	0.131183	0.0383578	1.14018
X5*Z1	-0.100796	0.0380655	0.904117
X2*Z1	0.142873	0.0380923	1.15358
X1*X6	-0.100534	0.0375118	0.904355



Tabla 3: Modelo de regresión estimado reducido

Fuente	Desviación	GI	Valor-P
Modelo	238.551	10	0.0000
Residuo	4.95749	5	0.4211
Total (corr.)	243.508	15	

El porcentaje de desviación explicado por el modelo es del 97.9641% y el porcentaje ajustado es del 88.9295 %. El algoritmo de selección eliminó dos factores principales de control (X1 y X2) y 3 interacciones. Entre las interacciones que quedaron en el modelo se encuentran X1 y X2 por lo que el modelo tiene presentes a todos los factores originales. Los porcentajes de desviación y porcentaje ajustados son altos, Como el valor-P de la tabla de Análisis de Desviaciones es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, con un nivel de confianza del 95.0%. Los modelos obtenidos para la media y la varianza se muestran a continuación:

Modelo para la media  $E(Y_{xz}) = \beta_0 + \mathbf{x}'\beta + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x}$

$$E(\hat{Y}_{xz}) = \frac{1}{1 - \exp\left[\frac{-0.953217 - 0.145302x_3 - 0.221633x_4 - 0.185119x_5 - 0.103138x_6}{-0.341925x_7 + 0.131183x_4x_7 - 0.100534x_1x_6}\right]} \quad (2)$$

Modelo para la varianza  $Var(Y_{xz}) = \sigma_z^2(\delta + \mathbf{x}'\mathbf{\Delta})'(\delta + \mathbf{x}'\mathbf{\Delta}) + \sigma^2$

$$Var(\hat{Y}_{xz}) = \frac{1}{1 - \exp\left[(-0.190845 + 0.142873x_2 - 0.100796x_2)^2 + 1.00484\right]} \quad (3)$$

Existen varias opciones para el planteamiento de optimización [5]. Mediante la aplicación de Programación No lineal con el algoritmo SLP se procede a realizar la optimización en el siguiente esquema:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \widehat{Var}[Y_{xz}] \\ & \text{s. a } \widehat{E}[Y_{xz}] = 0 \\ & \quad x_i > 0 \end{aligned}$$

Con el cual se logra el objetivo del Diseño Robusto de Parámetros que es el reducir la variación alrededor de la solución óptima, la cual en éste planteamiento es que el porcentaje de defectuosos sea cero. La optimización de los parámetros se realizó con el uso del optimization toolbox del software MATLAB. Una vez declaradas las funciones se definen los límites que para el caso propuesto son -1 y 1. Los resultados obtenidos son

Variable	Nivel
x1	-1.00000
x2	1.00000
x3	1.00000
x4	1.00000
x5	0.95317
x6	1.00000
x7	1.00000

El algoritmo converge en la sexta iteración con un valor de función de -0.559053.



Para las corridas de verificación se utilizaron los resultados con el algoritmo SQP, El objetivo principal del estudio es el de reducir el porcentaje de defectuosos que se generan del proceso. Se hicieron corridas de verificación con los niveles óptimos obtenidos para el proceso de acuerdo a la optimización. La primer corrida se realizó en el turno de la mañana con una producción de 214 piezas resultando 39 defectuosos en el proceso lo cual representa el 18.22% de defectuosos. La segunda corrida de verificación se realizó en el turno de la noche con una producción de 204 piezas y 43 defectuosos lo cual genera un 21.08% de defectuosos. En comparación con la proporción inicial de 43.57% de defectuosos se tiene una reducción del alrededor de 21.00% en la proporción de defectuosos lo cual se traduce en un ahorro importante en costos por mala calidad, la metodología propuesta mostró una mejora notable en la calidad de las suelas.

#### 4. CONCLUSIONES

Los esquemas de análisis para respuesta de tipo binario representan un reto importante dentro de la experimentación industrial debido al número elevado de corridas que se requieren para obtener valores de proporciones de manera confiable, se debe realizar una selección adecuada de los niveles en los factores experimentales con el fin de evitar la generación excesiva de defectuosos. El esquema experimental del Diseño Robusto de Parámetros permite obtener la combinación ideal de niveles para los parámetros críticos en el proceso con los cuales se obtiene la respuesta buscada la cual es resistente o insensible a los factores denominados de ruido, los cuales son difíciles o muy costosos de controlar.

El uso de los modelos de regresión logística permite analizar de forma adecuada experimentos en los cuales la respuesta obtenida es de tipo binaria o proporciones los cuales están basados en la distribución binomial y se sabe de antemano que los modelos de regresión no cumplen los supuestos clásicos de normalidad, independencia y varianza constante, la transformación logit permite superar de forma adecuada éste tipo de dificultades en el análisis con buenos resultados.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. Robinson, T. J.; Borrór, C.M. and Myers, R.M. 2004. "Robust Parameter Design: A Review". *Quality and Reliability Engineering International*, 20, pp 81-101.
2. Hamada M. and Nelder, J.A. 1997. "Generalized Linear Models for Quality-Improvement Experiments". *Journal Quality Techonology*, 29, pp 292-304.
3. Myers, R.H. and Montgomery, D.C. 2009. *Response Surface Methodology*. Wiley, USA.
4. Myers, R.H., Montgomery, D.C., Vining G.G. and Robinson T.J. 2010. *Generalized Linear Models with Applications In Engineering and the Sciencies*. Wiley, USA.
5. Mares, A., Domínguez, J. 2013. "Conditional Expectation and Variability in the Industrial Problem Solution". IIE Annual Conference. Proceedings. pp 3338-3347.A.