

Optimización en proceso de crimpado mediante diseño de experimentos en máquinas automáticas.

Autor: Alejandro Rodríguez Hernández ^[1], Octavio Medina Montenegro^[2]

[1] Alumno del posgrado, [2] DCM Draexlmaier Components Automotive de México S. de RL. de CV.

Correo electrónico: alejandro_rodriguez_85@hotmail.com, octavio7411@hotmail.com.

Resumen

Se realiza un diseño de experimentos para la optimización del proceso de crimpado en máquinas automáticas disminuyendo los defectos de alto impacto con cliente final y baja detección en producción como filamentos fuera de crimpado.

Se definen 5 factores que pueden influir en el proceso a optimizar: calibración del cable en la máquina, peinador del aplicador, diámetro de guía del cable, longitud de guía del cable y activación de parámetro de optimización en máquina.

Para los factores de longitud de guía del cable y calibración del cable en la máquina se realiza un nuevo diseño para realizar el experimento, ampliando la longitud de la guía para el primero y reduciendo el paso en los rodillos de alineación del cable en el segundo, quedando un diseño de 5 factores con 2 niveles cada uno.

El diseño factorial de 2^k es el elegido para determinar los factores ya mencionados con alta influencia en el proceso.

Se realiza el diseño de experimentos utilizando un cable multifilar de cobre de calibre 3.5 mm², obteniendo como resultado los factores con mayor influencia en el proceso de crimpado: longitud de guía del cable, activación de parámetro de optimización en la máquina y calibración del cable en la máquina.

Se define el tratamiento óptimo para el proceso de crimpado en máquinas automáticas, implementando las mejoras de diseño de la guía de cable y rodillos de calibración del cable, se desactiva el parámetro de optimización en la máquina y se implementan peinadores en los aplicadores aplicables de acuerdo a los resultados del diseño de experimentos.

Palabras claves

Diseño factorial 2^k , crimpado, optimización

Introducción

Antecedentes

Los terminales sirven a la conexión de enchufe de cables entrelazados o con un elemento estructural electrónico.

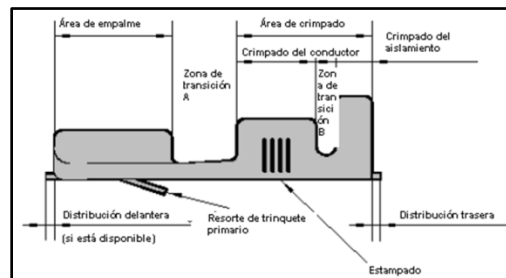


Figura 1 Estructura de la terminal

Los cables del vehículo son llamados arneses, los cuales son usados para la transmisión de corriente en vehículos de fuerza.

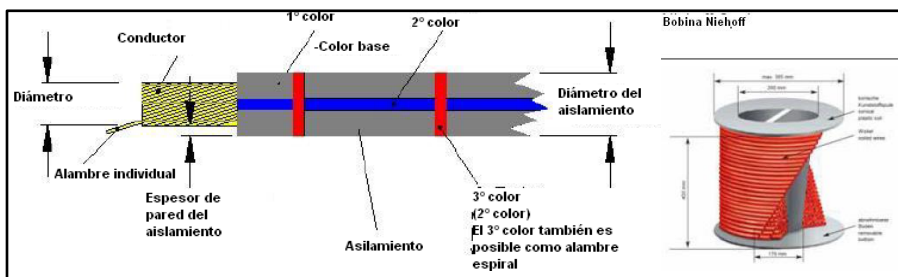


Figura 2 Construcción de un cable estándar

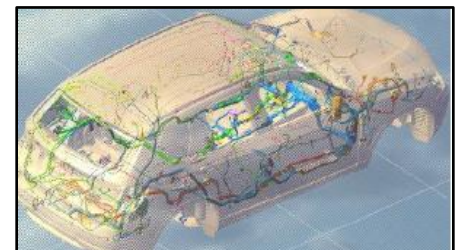


Figura 3 Ubicación del arnés eléctrico en un automóvil

Crimpar significa el enlace de una terminal con un cable a través de la compresión mecánica por medio de una herramienta de crimpado.

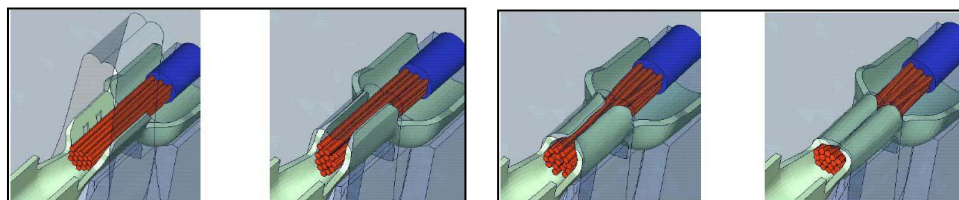


Figura 4 Etapas de crimpado

Las herramientas de crimpado (aplicador) se usan para la instalación de las terminales a los extremos del cable.

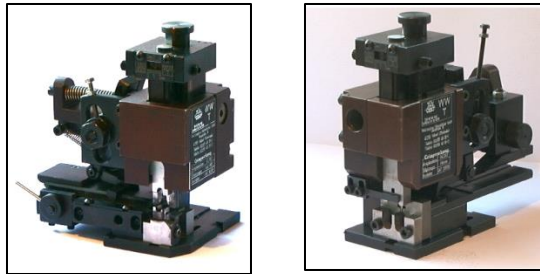


Figura 5 Herramienta de crimpado (aplicador)

Para la fabricación de un empalme de crimpado, se usan máquinas automáticas, semiautomáticas y también, en especial en casos de excepción definidos, pinzas manuales.



Figura 6 Prensa de mecanismo de máquinas de crimpado automático

Un proceso deficiente de crimpado, así como los cables fuera de posición de la terminal en el proceso de crimpado en máquinas automáticas, presentan defectos en el producto de:

- Filamentos fuera del área de crimpado.



Figura 7 Filamentos fuera del área de crimpado

Este error tiene un nivel de detección bajo en la fabricación del producto, ya que su detección es visual, fuera del alcance de la máquina.

Consecuencia de los defectos: Altos tiempos de paro de línea en armadoras automotrices por fallo en prueba eléctrica del carro.

Objetivo

- Definir las condiciones óptimas para el proceso de crimpado en máquinas automáticas para cables multifilares de cobre de calibre 3.5 mm².

Fundamentos

Diseño de experimentos en la industria

El diseño de experimentos es la forma eficaz de hacer pruebas en los procesos, consiste en determinar cuáles pruebas y cómo es que se deben utilizar, para obtener datos que al analizarlos estadísticamente se obtengan conclusiones y decisiones que deriven en mejores del desempeño del proceso.

Con el diseño de experimentos se pueden resolver problemas como los siguientes:

- Comparar dos o más proveedores del mismo material con el fin de elegir el que mejor cumple los requerimientos.
- Comparar varios instrumentos de medición para verificar si trabajan con la misma precisión y exactitud.
- Proponer una nueva manera de operar el proceso, variar sus condiciones y hacer cambios con el objetivo de reducir el número de defectos.
- Determinar los factores o fuentes de variabilidad que tienen impacto en la capacidad del proceso.
- Localizar condiciones de operación (temperatura, velocidad, humedad, etc.) donde el proceso logra su desempeño óptimo.
- Proponer un nuevo método de muestreo ya sea más efectivo o más económico que el actual. Reducir el tiempo de ciclo de proceso.
- Hacer el proceso insensible o robusto a oscilaciones de variables ambientales (ruido). Apoyar en el diseño o rediseño del producto o del proceso.

Clasificación y selección de los diseños experimentales

Los cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental son:

El objetivo del experimento

El número de factores a controlar

El número de niveles que se prueban en cada factor

Los efectos que interesa investigar

El costo del experimento, tiempo y precisión deseada. [1]

Tabla 1 Clasificación de diseños de experimentos por objetivo

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos	{ Diseño completamente al azar Diseño de bloques completos al azar Diseño en cuadros latina y grecolatina
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta	{ Diseños factoriales 2^k Diseños factoriales 3^k Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p}
3. Diseños para la optimización de procesos	{ Diseños para modelo de primer orden { Diseños factoriales 2^k y 2^{k-p} Diseño de Plackett-Burman Diseño simplex Diseños para el modelo de segunda orden { Diseño central compuesto Diseño de Box-Behnken Diseños factoriales 3^k y 3^{k-p}
4. Diseños robustos	{ Arreglos ortogonales (diseños factoriales) Diseño con arreglos interna y externa
5. Diseños de mezclas	{ Diseño de lattice-simplex Diseño simplex con centroide Diseño con restricciones Diseño axial

Experimentos factoriales 2^k

Este tipo de diseños experimentales consiste de un plan experimental en donde se estudia el efecto sobre una respuesta de k factores, cada uno con dos niveles. Generalmente los niveles en cada factor son denotados como bajo y alto, que en forma codificada representamos por -1 y $+1$ respectivamente. El diseño factorial completo requiere que cada nivel de todos los factores ocurra con cada nivel de todos los demás factores, lo que equivale a un total de 2^k tratamientos. Este tipo de diseño ha sido el de mayor impacto a nivel industrial y en la investigación, por su eficacia y versatilidad. Los factoriales 2^k completos son principalmente útiles cuando el número de factores a

estudiar está entre 2 y cinco, es decir $2 \leq k \leq 5$, rango en el cual el número de tratamientos se encuentra entre 2 y 32, cantidad manejable en muchas situaciones experimentales. Estos permiten atacar todo tipo de problemas y procesos de manera eficiente.

Diseño factorial general 2^k

Este diseño con k factores cada uno en dos niveles genera 2^k tratamientos o puntos de diseño. La matriz para este diseño, considerando una réplica, se puede construir de la siguiente manera:

- En la columna 1 de la matriz correspondiente a los niveles del factor A, se alternan los signos + y -, empezando con -, hasta llegar a los 2^k renglones;
- En la segunda columna que corresponde al factor B, se alternan dos signos - con dos signos +;
- En la tercera columna que corresponde al factor C, se alternan cuatro signos - con cuatro signos +;
- Así sucesivamente, hasta la k-ésima columna compuesta de 2^{k-1} signos - seguidos de 2^{k-1} signos +
- Los signos en las columnas correspondientes a los grupos de interacciones resultan de multiplicar las columnas de los factores que aparecen en cada interacción. Por ejemplo, para la columna de los signos que define el contraste del efecto ACD en un factorial 2⁵ se multiplican las columnas de los signos de A×C×D.

Diseño factorial 2^k no replicado

Cuando aumenta el número de factores en el diseño 2^k crece rápido el número de tratamientos y por lo tanto el número de corridas experimentales.

Por lo cual para más de cuatro factores ($k \geq 5$), es recomendable realizar solo una réplica o incluso la mitad de una o fracción de una réplica.

Tabla 2 Definición de réplicas de acuerdo al diseño factorial

Diseño	Réplicas recomendadas	Número de corridas
2^2	3 o 4	12, 16
2^3	2	16
2^4	1 o 2	16, 32
2^5	fracción 2^{5-1} o 1	16, 32
2^6	fracción 2^{6-2} o fracción 2^{6-1}	16, 32
2^7	fracción 2^{7-3} o fracción 2^{7-2}	16, 32

En un experimento pueden existir tres tipos de efectos: Los que claramente son significativos, los que claramente no afectan y efectos intermedios sobre los cuales no es claro si son significativos o no. Esto últimos son los problemáticos para nosotros. Las técnicas para decidir qué efectos enviar al error no funcionan bien cuando el diseño completo tiene pocos efectos, como el caso de diseños 22 y 23, pero estos por lo general se corren con réplicas. Las técnicas que se presentan a continuación son útiles para factoriales con $k \geq 4$ factores.

Gráfico de efectos en papel normal): Considerando que los efectos estimados como sumas de variables aleatorias, los efectos no significativos deben seguir una distribución normal con media igual a cero y varianza constante. Por tanto, si graficamos los efectos sobre papel de probabilidad normal, aquellos que son no significativos tenderán a formar una línea recta ubicada a la altura del cero, lo que permite comprobar que tales efectos son insignificantes. Por otro parte, los efectos activos o significativos aparecerán alejados de la línea de normalidad, lo que indica que no se deben sólo al azar, sino a la existencia de efectos reales que influyen en la respuesta. Entre más alejado de la línea más importante será el correspondiente efecto.

Diagrama de Pareto de efectos: Este Pareto es una gráfica de barras que representa los efectos sin estandarizar ordenados en forma descendente (de mayor a menor) de acuerdo a con su magnitud absoluta. Es una forma fácil de ver cuáles efectos son los más grandes en cuanto a su magnitud y presentan la realidad observada de los efectos de modo descriptivo sin considerar supuestos distribucionales.

Muchas veces con el diagrama de Pareto y el gráfico de probabilidad normal de los efectos se logra detectar claramente los efectos significativos. [2]

Procedimiento

Se realiza la planeación del diseño de experimentos para optimizar el proceso de crimpado en máquinas automáticas que permita reducir el defecto presentado en proceso: filamentos fuera.

Se determinan los factores que pueden tener mayor influencia en el óptimo proceso de crimpado: calibración del cable en la máquina, peinador del aplicador, diámetro de guía

del cable, longitud de guía del cable y activación de parámetro de optimización en máquina.

Para los factores de longitud de guía del cable y calibración del cable en la máquina se realiza un nuevo diseño para el experimento, ampliando la longitud de la guía para el primero y reduciendo el paso en los rodillos de alineación del cable en el segundo.



Figura 8 Guía del cable larga

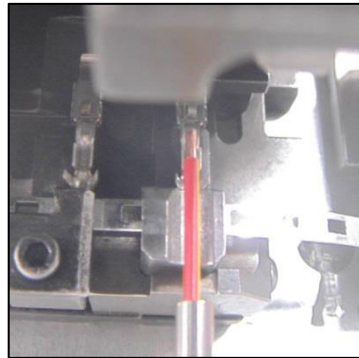


Figura 9 Guía del cable corta



Figura 10 Rodillo de alineación con paso estrecho



Figura 11 Rodillo de alineación con paso amplio

Con las mejoras en diseño mencionados, los niveles de los factores determinados quedan de la siguiente manera:

Calibración del cable en la máquina: rodillos de alineación del cable grande (+) y rodillo de alineación del cable chico (-).

Peinador del aplicador: instalado (+) y desinstalado (-).

Diámetro de paso de guía del cable: $\varnothing 2.5$ (+) y $\varnothing 2.0$ (-).

Longitud de guía del cable: larga (+) y corta (-).

Activación de parámetro de optimización en la máquina: activado (+) y desactivado (-).

Se determina la variable de respuesta a medir: porcentaje de crimpados malos en 100 crimpados de muestra por corrida.

Se considera el diseño factorial de 2^k para determinar los factores con mayor influencia en el desempeño óptimo del proceso de crimpado, en base a la investigación bibliográfica expuesta en el marco teórico.

Se plantea el plan experimental con un diseño factorial de 2^k y los signos de los efectos principales para $k \leq 5$ con 32 corridas.

Se realiza las corridas experimentales de acuerdo al plan experimental con cable multifilar de cobre de calibre 3 mm² en máquinas de crimpado automáticas.

Resultados y análisis de resultados

Se determinan las gráficas de Pareto de los efectos, grafica normal de los efectos, grafica de interacción para resultados y grafica de efectos principales para los resultados, para el análisis y descripción de los resultados del comportamiento de los factores en el experimento.

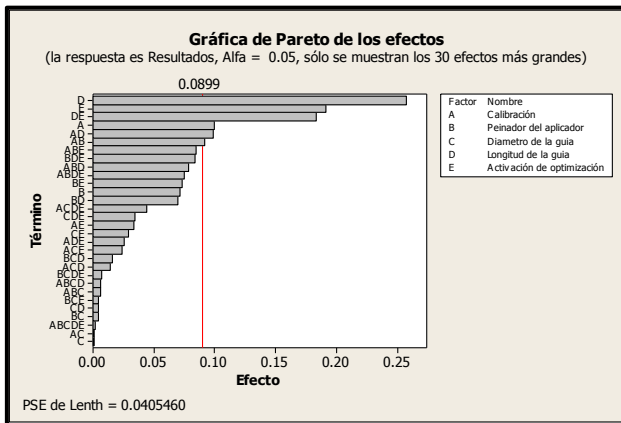


Figura 12 Gráfica de Pareto

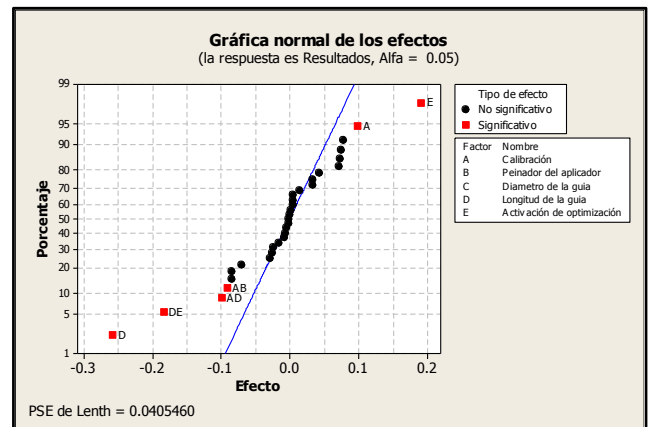


Figura 13 Gráfica normal

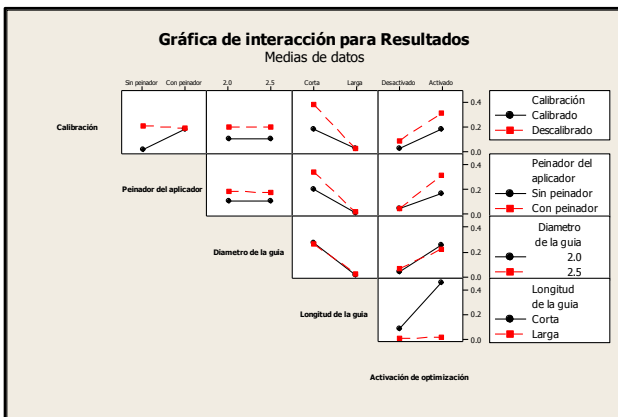


Figura 14 Gráfica de interacción

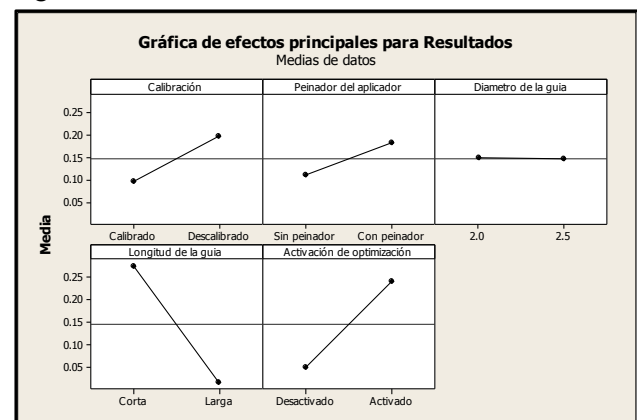


Figura 15 Gráfica de efectos principales

Las gráficas de efectos normales y el diagrama de Pareto, describen a los efectos significativos en el proceso de crimpado: A (Calibración del cable en la máquina), D (Longitud de guía del cable), E (Activación de parámetro de optimización en la máquina), AB (Interacción: Calibración del cable en la máquina- Peinador del aplicador) y AD (Interacción: Calibración del cable en la máquina- Longitud de guía del cable).

Con las gráficas de efectos principales y de interacción se determinan los tratamientos que muestran un proceso de crimpado óptimo (menos porcentaje de crimpados malos en 100 crimpados de muestra por corrida).

Se determina el mejor tratamiento:

A: Calibración del cable en la máquina: rodillo de alineación del cable chico (-).

B: Peinador del aplicador: instalado (+).

C: Diámetro de paso de guía del cable: $\varnothing 2.0$ (-).

D: Longitud de guía del cable: larga (+).

E: Activación de parámetro de optimización en la máquina: desactivado (-).

Conclusiones

Las mejoras en los diseños de los rodillos de alineación de cable y longitud de guía del cable, así como la desactivación del parámetro de optimización e instalación de peinador en el aplicador favorecen a la optimización del crimpado de cables multifilares de cobre de calibre 3.00 mm², siendo estos tres efectos los de mayor influencia en el porcentaje de crimpados malos y por consecuencia los defectos presentados en proceso.

El diámetro de paso de guía del cable a pesar que no tiene un efecto significativo en el resultado, el trabajar con un diámetro menor favorece al proceso.

Bibliografía

[1] MONTGOMERY, D.C. Diseño y Análisis de Experimentos. México, D.F.: Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores, 2003.589 p.

[2] GUTIÉRREZ PULIDO, H. y DE LA VARA SALAZAR, R. Análisis y diseño de experimentos.

México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2004. 545 p.