

Aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) para la mejora de procesos¹

Dr. Ing. Martín Tanco²

TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastián, España

Dra. Laura Ilzarbe; Dra. Elisabeth Viles; Dra. M. J. Alvarez

TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastián, España

Resumen

Se presenta un caso de estudio realizado en una reconocida empresa del sector de la automoción, en la cual trabajan cerca de 4000 empleados para producir un único modelo de auto³. El proceso analizado es la soldadura láser aplicada para unir los laterales del auto y su techo, la cual es realizada en una cabina cerrada por medio de dos robots. Este proceso presentaba problemas de calidad, ya que la aparición de poros en ambos cordones de la soldadura era frecuente. Por ello, se recurrió a la experimentación y en concreto al Diseño de Experimentos (DoE) para mejorar el proceso. El proyecto obtuvo una reducción del 97% de los poros, ya que se comenzó con una tasa media de defectos del 3% y se concluyó con una tasa media de defectos del 0,09%.

Introducción

Las personas realizan experimentos frecuentemente; trabajadores de una ciudad buscan el camino más corto y/o rápido para llegar a trabajar, en cada casa se experimenta con las recetas de cocina para mejorar el sabor de los platos servidos o se analizan distintas alternativas para mejorar el estado físico. En la industria, la experimentación suele utilizarse básicamente en dos áreas: el diseño y la mejora de procesos y productos. La experimentación proporciona en estos casos la descripción aproximada de cómo se comportan los procesos y/o productos, restringida a una región de interés. La mejora de los procesos es generalmente el objetivo hasta que este alcanza el nivel deseado [2].

Pero, la mayoría de los problemas industriales, están condicionadas por el tiempo y el presupuesto, lo que supone una limitación importante a la hora de experimentar. Por eso todas las empresas deberían intentar responder antes de realizar sus experimentos la siguiente pregunta, ¿Cómo puedo obtener de los experimentos la mayor información posible y de la manera más eficiente?

La bibliografía clasifica las estrategias utilizadas para llevar a cabo las experimentaciones en las empresas en tres categorías [3]: mejor acierto (Best Guess), un-factor-por-vez (OFAT) y siguiendo una metodología estadística (DoE). La estrategia de “mejor acierto” consiste en, utilizando el conocimiento previo sobre el proceso en cuestión, modificar las variables involucradas y conducir las pruebas bajo condiciones en las cuales se esperan los mejores

¹ Versión reducida y traducida del artículo “Applying Design of Experiments to improve a laser welding process”, Tanco et al, 2008 [1]

² Esta publicación ha sido fruto de una aplicación incluida en la tesis doctoral titulada “Metodología para la aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) en la industria” defendida por el Ing. Martín Tanco el 17 de Julio del 2008.

³ Por razones de confidencialidad se omite el nombre de la empresa y los valores específicos de los parámetros en los cuales se realizaron los experimentos.

resultados. Dicho estrategia carece de rigor científico ya que se basa únicamente en la intuición y la experiencia. La estrategia de “un-factor-por-vez” consiste en ir modificando cada vez un solo factor (variable) y distinguir los efectos que tiene sobre la respuesta cada factor por separado. Esta estrategia, a pesar de ser la más utilizada en las empresas y seguir el “método científico”, es ineficiente para hallar las mejores condiciones del proceso. Además, no detectan sistemáticamente las posibles relaciones (interacciones) que pueden existir entre varios factores [4].

Es por ello necesario, y más eficiente en términos de los resultados obtenidos y número de experimentos, utilizar como estrategia para la experimentación una metodología estadística preestablecida para poder planificar y analizar correctamente los experimentos. Como afirma Deming [5] (considerado uno de los padres de la Calidad Total), “no hay conocimiento que pueda contribuir tanto a mejorar la calidad, la productividad y la competitividad como el de los métodos estadísticos”.

La metodología estadística por excelencia para optimizar la experimentación se conoce como Diseño de Experimentos, la cual se abrevia como DoE proveniente de su significado en inglés: “Design of Experiments”. Se define simplemente como un método para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación [6]. Más precisamente, puede ser definido como realizar un conjunto de pruebas en las cuales se realizan cambios voluntarios a los parámetros de control de un proceso o sistema, para observar e identificar las razones de los cambios en la variable de salida o respuesta del proceso [3].

Este artículo presenta una aplicación del Diseño de Experimentos para mejorar un problema de calidad: la aparición de poros en un proceso de soldadura láser. El objetivo de este artículo es enfatizar el proceso de planificación y el diseño de los experimentos llevado a cabo para mejorar el problema de calidad. También se incluyen los resultados de los experimentos, así como su posterior análisis.

Descripción del proceso

El proceso bajo estudio es el que se encarga de soldar cada uno de los costados del coche con el techo. En dicho proceso, las tres partes del coche son introducidas a una cabina cerrada en donde son soldadas con aporte de material por un robot a través de un láser. Existen dos cordones de soldadura, uno a cada lado del coche, los cuales son producidos por dos robots gemelos pero completamente independientes. Este proceso presentaba problemas de calidad, ya que la presencia de poros en la soldadura era frecuente (Ver Figura 1). Esto representa un problema por tres motivos,

- Estructural: Afecta a la resistencia de la unión
- Estética: Los poros afectan a la principal razón para elegir dicha soldadura que es el buen acabado de la misma. Además, como posteriormente se pintan los coches, pueden aparecer burbujas.
- Impermeabilidad: Generalmente el poro es muy pequeño y no llega a que penetre el agua. Pero, su presencia puede favorecer la corrosión.

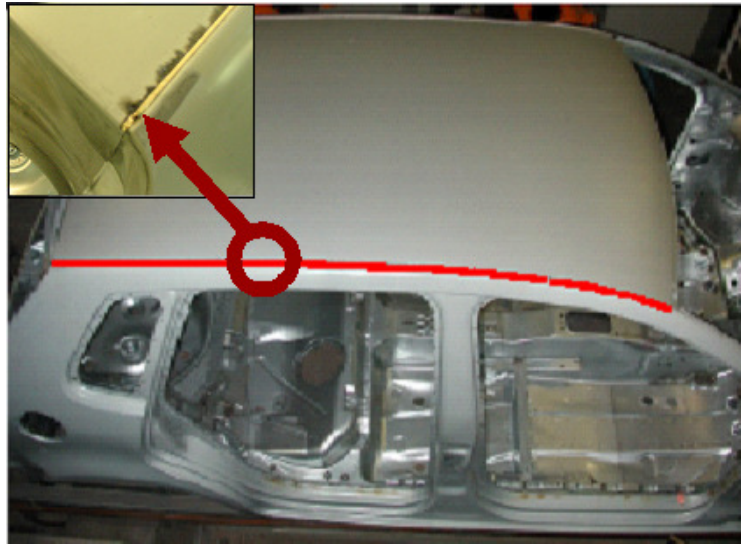


Figura 1 - Presencia de poros en el cordón de soldadura

Definición del proyecto

El gerente de la sección de Chapistería, promotor de esta aplicación, decidió comenzar un proyecto creando un grupo multidisciplinar para resolver el problema. Él estuvo involucrado durante todo el proceso de experimentación, lo cual fue uno de los mayores éxitos del proyecto, ya que estaba comprometido con el proyecto. El resto del grupo estaba motivado hacia la obtención de resultados y la dedicación de tiempo al mismo estaba justificada y avalada por la alta dirección. El gerente designó el grupo de trabajo de la empresa, formado por cuatro personas: el Jefe de Fábrica, un responsable del Departamento de Planificación, un responsable del Departamento de Calidad y un representante del Departamento de Mantenimiento. Por parte de TECNUN, trabajaron conjuntamente los cuatro autores de este artículo.

Una vez formado el equipo de trabajo, se comenzó con un análisis previo (Fase 0) para asegurarse que tenía sentido recurrir a la experimentación para solucionar el problema. Entre otras actividades se construyó un diagrama de flujo (Figura 2) construido para establecer claramente el proceso y delimitar el estudio. Además, se diseñó una hoja de recolección de datos, para recolectar tres semanas de información sobre los poros.

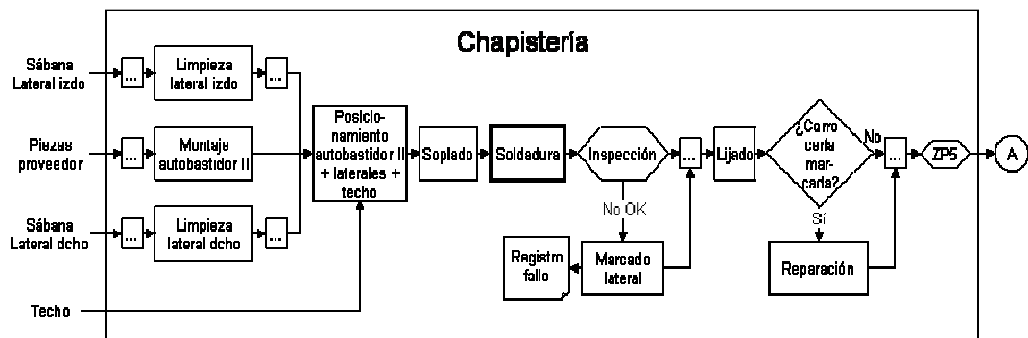


Figura 2 - Diagrama de Flujo del Proceso

Los resultados de la fase previa mostraron que el porcentaje de autos defectuosos era del 3%, porcentaje superior al deseado por los directivos. Se realizó una estimación del coste de calidad de los defectos en 33.600 euros/ anuales, a la cual se deben sumar además los costos implicados al tener que re-trabajarlos fuera de la línea de producción. Finalmente, el desconocimiento de la influencia de los parámetros que afectan al proceso, evita actuaciones sobre el proceso eficientes. Dichos resultados motivaron a continuar con el proyecto.

Planificación de los experimentos

La primera decisión importante es seleccionar la respuesta para los experimentos. Las respuestas elegidas son el “% cordones izquierdos defectuosos de 2 puertas” y el “% cordones derechos defectuosos de 2 puertas”. Se separan dichos indicadores ya que se consideran cada uno de los lados como procesos independientes. Dichos indicadores se calculan como el total de cordones con poros, sobre el total de autos producidos. Se decidió continuar con los registros de poros utilizados para la fase 0.

Experimentar con respuestas binarias (bueno/malo) es difícil [7], ya que se posee poca información. Por ello, se analizaron varias alternativas, para mejorar la “calidad” de la respuesta. Primero, se busco una respuesta continua, y la única opción viable era la distancia entre poros. Lamentablemente, la medida era poco fiable por el sistema de medidas disponible para contar la cantidad de autos entre dos con defectos. Luego se analizó alguna variable cuantitativa de más niveles, y entre ellas destacó la cantidad de poros. Nuevamente, fue descartada porque presentaba como desventajas frente a la alternativa que era menos fiable, que la cantidad de poros/defecto era cercana al 1 y que el costo del problema estaba más relacionado al defecto, ya que el problema es tener que sacar el coche de la línea.

Posteriormente, se identificaron todos los factores (variables) involucrados en el proceso. Para ello, se realizó una sesión de lluvia de ideas (brainstorming) para identificar todos los posibles factores potenciales. Como surgieron más de 40 factores, muchos de los cuales estaban relacionados, se utilizó un diagrama de afinidad en la misma sesión, para agrupar los factores. Posteriormente, con los 19 factores resultantes, se construyó un diagrama causa-efecto para visualizar mejor el problema (Figura 3).

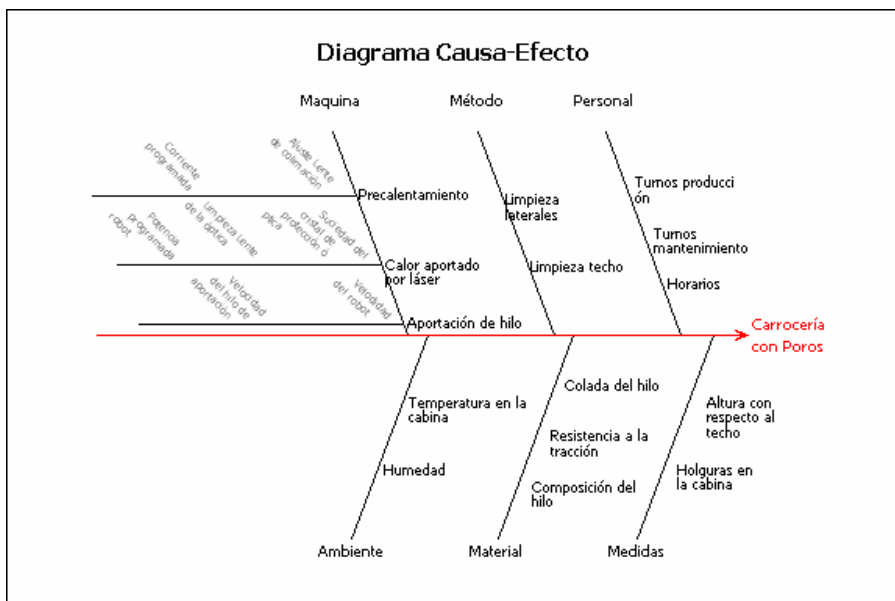


Figura 3 - Diagrama Causa-Efecto de los factores

Luego se intentó clasificar cada uno de los 19 factores, considerado la experiencia del grupo de trabajo y el elevado costo de involucrar excesivas variables. Finalmente, se estableció que sólo cuatro factores serían considerados primarios en una primera instancia:

- Potencia programada del robot (en adelante Potencia): Es la potencia con la que suelda el robot. A mayor potencia, mayor energía en la soldadura.
- Corriente programada de pre-calentamiento (en adelante Corriente): La máquina Fronius está encargada de precalentar el hilo de aportación, que es una manera de dar energía a la soldadura.
- Limpieza de los laterales: La limpieza de los laterales, se debe hacer manualmente con un trapo con alcohol.
- Limpieza del techo: Ya existía un soplado de aire para limpiar el techo, pero se desea estudiar si además conviene soplar con alcohol a los dos cordones.

Existían otros factores importantes que podían influir en el proceso, como la velocidad del robot, la colada del material, las holguras en la cabina, etc. A pesar de ello, la mayoría de estos factores no eran generalmente modificados, por lo que fueron mantenidos constantes. Finalmente, otros 11 factores fueron considerados molestos, ya que eran prácticamente imposibles de modificar bajo circunstancias normales del proceso.

La máxima cantidad de días en los cuales experimentar, fue fijada por la gerencia en aproximadamente 20 días de producción. La secuenciación de los experimentos era posible, por lo que se decidió gastar en la primera experimentación, menos de la mitad de los experimentos, considerando que sólo se experimentaría con cuatro factores primarios. El objetivo inicial de la primera experimentación, era cuantificar los efectos principales de los factores (Caracterización). Como además, se preveía que las interacciones importantes fueran pocas, se consideró que un diseño factorial fraccionado podía ser suficiente para llevar a cabo la primera experimentación⁴. Además, la utilización de un diseño sencillo era uno de los requisitos, ya que esta aplicación serviría de ejemplo para futuras aplicaciones en la industria.

Dada la importancia de las interacciones y las restricciones en el número de experimentos se consideró que un diseño factorial fraccionado de resolución IV sería adecuado para esta primera fase. El generador elegido es $I=ABCD$, y la colocación de los factores en cada columna es indiferente. En el diseño no se incluyeron puntos centrales, ya que no tendría sentido por la presencia de dos factores cualitativos (serían 4 puntos centrales). Finalmente, se decidió aleatorizar el orden de los experimentos para prevenirse de la influencia de los factores no considerados en esta experimentación. El diseño elegido se presenta en la Tabla 2 junto con los resultados obtenidos.

Lamentablemente, la selección de la unidad experimental (en nuestro caso la cantidad de autos que se fabrican con la misma condiciones de los factores) para procesos continuos no es inmediata [10]. Se estaba condicionado por los factores de personal (horarios de trabajo y turnos), por lo que para bloquear el efecto de dichos factores era prácticamente necesario elegir al menos un día completo de experimentación (aproximadamente unos 300 autos) por cada condición del diseño experimental. Se chequeo la potencia que tenía dicho diseño en las tablas prácticas provistas en Bisgaard-Fuller [11]. Dichas tablas otorgan la unidad experimental que se debe elegir, con la potencia del diseño y la señal que se espera detectar. Luego de un compromiso entre la potencia del diseño y la cantidad de experimentos, se eligió un día como la unidad experimental para cada experimento.

⁴ Por la naturaleza del problema, también se consideró la posibilidad de usar el procedimiento de EVOP, introducido por Box [8]. Se descartó, ya que era muy difícil uno de sus pre-requisitos que es mantener la producción durante un período largo de tiempo [9].

Bisgaard-Gerbakh [7] proponen una alternativa a experimentar con un tamaño fijo de muestra. Explican que en lugar de producir una cantidad grande de defectos (tamaño fijo), esta alternativa intenta terminar cada experimento cuando se producen una cantidad determinada de defectos y se continúa con un nuevo experimento que se esperan mejores condiciones. A pesar de las grandes ventajas que presentaba esta alternativa, fue descartada por dos razones. En primer lugar, por la imposibilidad de cambiar los parámetros (en especial las limpiezas) a cualquier hora del día. En segundo lugar, porque de esta forma no se bloqueaba el efecto del horario de trabajo ni de los turnos de los operarios.

Luego se procedió a establecer los niveles para los factores cuantitativos, ya que los cualitativos sólo había dos posibilidades. A pesar de ello, se hizo especial énfasis en estandarizar los factores cualitativos, es decir la forma en que eran limpiados los coches. Los niveles de la potencia y la corriente fueron elegidos basados en la experiencia. Se colocaron valores donde se esperaban resultados alentadores.

Debido a las dimensiones de la empresa (más de 4000 empleados), la comunicación y la logística necesaria para realizar los experimentos fue más complejo de lo esperado. Era muy importante entrenar a todo el personal involucrado para que hicieran las actividades correctamente, para que no se modifiquen los factores constantes y para evitar procedimientos de mantenimiento puntuales en las fechas de la experimentación. Finalmente, se estableció un procedimiento de control de la experimentación, para el cuál los operarios tenían indicaciones claras para tratar con alguna combinación muy mala, en caso de que sucediera.

Cuando se trabaja con procesos continuos, es raro que se necesite realizar pruebas piloto, ya que la región de interés es generalmente elegida en los alrededores de la zona donde actualmente se produce [10]. A pesar de ello, se hicieron algunas pruebas, para ver si era posible bajar la potencia. Los resultados fueron muy malos por lo que se confirmó el límite inferior de la potencia.

Como la hoja de recolección de datos había sido previamente diseñada para la fase 0, no fue necesaria una nueva. Los resultados obtenidos de la experimentación se presentan en la Tabla 2. Se puede apreciar, que hay resultados muy buenos, y otros todo lo contrario muy malos.

Nº	Potencia (A)	Corriente (B)	Limpieza Laterales (C)	Limpieza Techo (D)	% Derecha	% Izquierda
1	-	-	+	+	0.794	1.984
2	-	-	-	-	1.277	8.936
3	+	+	+	+	1.702	3.83
4	+	-	+	-	0.781	4.314
5	-	+	-	+	0.87	6.061
6	+	-	-	+	0.00	0.415
7	+	+	-	-	1.74	9.13
8	-	+	+	-	0.905	7.692

Tabla 2 - Layout y resultados del experimento

Análisis e interpretación de los resultados

Antes de comenzar con el análisis recordar que el análisis debe ser iterativo, por lo que se presentan los resultados finales. Se utilizó el software Design-Expert para el análisis, que consistió en las siguientes etapas:

- 1- Seleccionar una transformación de la respuesta (si aplica)
- 2- Calcular los efectos y graficarlos en un gráfico de probabilidad normal
- 3- Realizar un análisis ANOVA con los efectos seleccionados
- 4- Chequear los residuos
- 5- Construir gráficas de los efectos

El análisis de un diseño de experimentos esta basado en el supuesto que la respuesta tiene la misma varianza. Lamentablemente, cuando se considera como respuesta defectos, se viola dicha condición. Bisgaard-Fuller [12] recomiendan transformar las respuestas de %, con la raíz cuadrada del arco seno de la respuesta original.

La Tabla 3 presenta la lista de los efectos para ambos lados. El efecto de un factor expresa la variación de la respuesta causado por el cambio únicamente de un factor desde su nivel bajo (-) hasta el alto (+). El diseño posee resolución IV, por lo que los efectos principales están aliados con interacciones de orden tres y las interacciones están aliadas entre sí.

Efectos Derecha(%)		Efectos Izquierda(%)	
AB + CD	0,74	D	-4.45
B	0,59	B	2.77
D	-0.33	A	-1.75
BD + AC	0.30	C+ABC	-1.68
A	0.09	AB + CD	1.35
AD + BC	-0.08	BD + AC	0.98
C+ABC	0.07	AD + BC	-0.15

Tabla 3 - Efecto de los factores

Un análisis con gráficos de probabilidad normal nos permitieron elegir que factores incluir en el ANOVA. Este gráfico de gran utilidad y sencillez permite visualizar gráficamente aquellos efectos significativos, ya que los efectos no significativos aparecen distribuidos a lo largo de una línea recta. Como ejemplo la Figura 4 muestra el gráfico de probabilidad normal para el lado derecho.

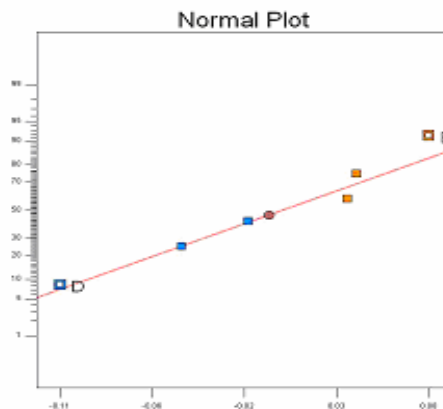


Figura 4 - Gráfico de Probabilidad normal Derecha

Posteriormente, un análisis formal a través de un ANOVA (Analysis of Variance) fue llevado a cabo para verificar estadísticamente la significancia de los efectos (Ver Tabla 4). Es un método estadístico preciso y formal, que consiste en asignar la varianza total a los factores para así poder realizar pruebas estadísticas (pruebas-t y pruebas-F) para saber, con un determinado nivel de confianza, los efectos que influyen significativamente en la respuesta [13]. Las réplicas o la suposición de ciertas interacciones despreciables es lo que permite calcular el error. Se considera un efecto significativo, cuando el p-valor del factor es menor que 0,05 (se puede considerar hasta 0,10 para algunos casos). La utilización del ANOVA, implica que se cumplan ciertas hipótesis con los residuos, los cuales fueron satisfactorios en este análisis.

Source of Variation	Sum squares	Deg. of freedom	Mean square	F-Value	p-value
Modelo	0,0427	3	0,0142	7,382	0,042
A-Potencia	0,0049	1	0,0049	2,543	0,186
B-Corriente	0,0124	1	0,0124	6,444	0,046
D-Limpieza techo	0,0253	1	0,0253	13,159	0,022
Residual	0,0077	4	0,0019		
Cor Total	0,0504	7			

Tabla 4 - Análisis ANOVA lado izquierdo

La primera conclusión del análisis, fue que el factor C-“Limpieza de los laterales” salió como el menos importante, por lo que se decidió eliminarlo del análisis para tener un factorial completo en los tres factores restantes. Luego, los resultados mostraron que el único efecto significativo en la derecha era la interacción AB, y que los únicos efectos significativos en la izquierda eran la limpieza del techo (D) y la corriente (B). A continuación se presenta en la Figura 5 dos gráficos para visualizar los resultados obtenidos. En primer lugar, se presenta los resultados de la interacción AB en la derecha y en segundo lugar el efecto del factor D en la izquierda. Tiene especial interés el primer gráfico, ya que contradice la teoría habitual de que aumentar la potencia empeora la situación de los poros. La conclusión del experimento, es que depende a que nivel esté la corriente.

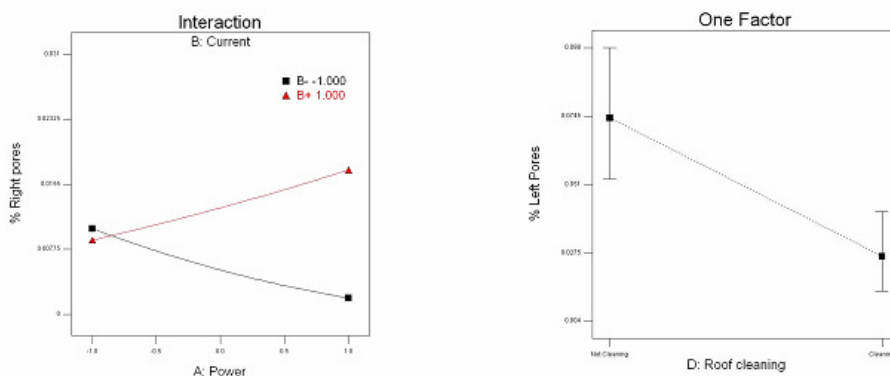


Figura 5 - a) Gráfico de Interacción AB derecha. b) Efecto de D izquierda

Lamentablemente, debido a la potencia pequeña que tenía el diseño pocos factores surgieron como significativos. Por ello, una nueva etapa de experimentación fue realizada con dos factores: Potencia y Corriente. La influencia de los dos factores cualitativos ha quedado clara. En primer lugar, la limpieza de los coches es fundamental en el lado izquierdo y tiene el mismo signo en el lado derecho. Por lo que si nuestro objetivo es minimizar la respuesta, el factor D debe ser fijado en su nivel (+), o sea limpiar. Además, como no es posible limpiar en un solo lado, ya que la máquina está diseñada para soplar en ambos cordones, se decide limpiar para ambos procesos. Por el contrario, se mostró que no tiene influencia la limpieza de los laterales.

Debido a que se tenían pocos factores se decidió estudiar un modelo de segundo orden para la segunda experimentación, por lo que se utilizó un diseño adecuado que estimara todos los parámetros necesarios. Como la región es cúbica, ya que experimentar fuera de la zona podría implicar no soldar o crear una “sopa” de poros, se eligió un diseño central compuesto centrado en las caras (FCC). En la Tabla 5 se presenta el diseño elegido para la experimentación, junto con los resultados obtenidos. Se decidió incluir dos puntos centrales, ya que para los FCC son suficientes [14]. Nuevamente los experimentos fueron aleatorizados.

Los niveles fueron elegidos con la información de la experimentación anterior. En primer lugar, se intenta reducir la corriente, ya que tenía un efecto positivo. Como la potencia está restringida y no salió significativa se mantiene el rango del experimento anterior.

Nº	Potencia	Corriente	% Derecha	% Izquierda
1	-	0	0,279	0
2	0	0	0	0
3	+	-	0	0,308
4	0	+	0,631	0
5	-	+	0,65	1,94
6	-	-	0,35	0
7	+	+	0,385	0,769
8	0	-	0,339	0
9	0	0	0	0
10	+	0	0	0

Tabla 5 - Layout de la segunda experimentación

Los resultados de las dos columnas de resultados muestran una mejora significativa en los porcentajes de poros. En promedio, únicamente 0,30% de los autos tenían poros, lo que significa una reducción del 90% con respecto a la situación inicial del 3%. Por último, que los resultados hayan sido tan positivos va en detrimento del análisis, ya que por ejemplo en el lado izquierdo siete de los diez experimentos dan 0 poros.

Un análisis ANOVA del lado derecho mostró que la potencia (A), la corriente (B) y el término cuadrático (B²) son significativos. El primer efecto tiene una influencia negativa en la respuesta y los otros dos una influencia positiva. Por el contrario, para el lado izquierdo como era de esperar no resultó ningún efecto significativo.

Habiendo analizado ambos lados, se concluyó que las condiciones del punto central (0,0) serían las mejores condiciones para operar en el futuro. Cinco días de producción con estos parámetros

fueron llevados a cabo para corroborar los resultados obtenidos del análisis. Únicamente un poro surgió durante estos días, por lo que el proyecto sería un éxito de continuar la producción con esta tasa de defectos.

Conclusiones

Transcurrido un tiempo, se realizó un análisis confirmatorio para verificar que los resultados se mantenían en el tiempo. Luego de un análisis de dos meses de producción, los porcentajes de poros en el lado derecho fueron de 0,14%, mientras que en el lado izquierdo fue de 0,03%. Esto significa una reducción promedio de los poros de un 97%.

La experiencia fue positiva y muy constructiva. Utilizando un diseño sencillo, se obtuvo una reducción importante del problema. Además, la experiencia fue muy buena en cuanto a aprendizaje de la herramienta, especialmente para los que trabajan en la industria. En definitiva, este proyecto mostró la utilidad del Diseño de Experimentos para la mejora de procesos y servirá de ejemplo para nuevos proyectos de aplicación del DoE en esta empresa.

Bibliografía:

1. Tanco, M., et al., Applying Design of Experiments to improve a laser welding process. *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part B*, 2008. 222(8): p. In press.
2. Ryan, T.P., *Modern Experimental Design*. 2007: John Wiley & Sons, Inc.
3. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. 2005: John Wiley & Sons, Inc.
4. Czitrom, V., One factor at a time versus Designed Experiments. *The American Statistician*, 1999. 53(2): p. 126-131.
5. Deming, W.E., *Out of the crisis*. 1982, Cambridge, MA: MIT Center for Advanced Engineering Study.
6. Lye, L.M. *Tools and toys for teaching design of experiments methodology*. in *33rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*. 2005. Toronto, Ontario, Canada.
7. Bisgaard, S. and I. Gersbakh, 2k-p Experiments with Binary Responses: Inverse Binomial sampling. *Journal of Quality Technology*, 2000. 32(2): p. 148-156.
8. Box, G.E.P., J.S. Hunter, and W.G. Hunter, *Statistics for Experimenters - Design, Innovation and Discovery*. Second Edition ed. Wiley Series in Probability and Statistics, ed. Wiley. 2005, John Wiley & Sons.
9. Hahn, G.J. and A.F. Dershowitz, Evolutionary Operation To-day-Some Survey Results and Observations. *Applied Statistics*, 1974. 23(2): p. 214-218.
10. Vanhatalo, E. and B. Bergquist, Special considerations when planning experiments in a continuous process. *Quality Engineering*, 2007. 19: p. 155-169.
11. Bisgaard, S. and H.T. Fuller, Sample Size Estimates for 2k-p designs with binary responses. *Journal of Quality Technology*, 1995. 27(4): p. 344-354.
12. Bisgaard, S. and H.T. Fuller, Analysis of Factorial Experiments with defects or defectives as the response. *Quality Engineering*, 1994. 7(2): p. 429-443.
13. Lorenzen, T.J. and V.L. Anderson, *Design of Experiments - A No-Name Approach*, ed. Dekker. 1993. 414.
14. Myers, R.H. and D.C. Montgomery, *Response Surface Methodology*. 2º Edición ed. 2002: Wiley - Interscience