DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 301-307

# Diseño de experimentos a través de la metodología de superficies de respuesta para mejorar la penetración de soldadura en la industria automotriz
# Design of experiments using response surface methodology to improve weld penetration in the automotive industry

L. D. Jimenez Castro [a], S. Y. González Canales [a*], O. Aguilar-Mejía [a], H. Minor-Popocatl [b], D. Sánchez-Partida [b]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[b] *Faculty of Industrial Systems; UPAEP University - CONCYTEP, 72410 Puebla, PUE, México.*

**Resumen**

Los requerimientos en la calidad de los procesos industriales, en específico del sector automotriz, obligan a las organizaciones a perfeccionar sus procedimientos para cumplir con dichas exigencias. El objetivo del artículo es presentar una propuesta para analizar y mejorar la penetración en el proceso de soldadura por haz láser (LBW) en estructuras de asientos automotrices, utilizando una máquina TRUMPF TruDiode 3006, mediante el enfoque de Diseño de Experimentos (DoE) a través de la metodología de superficie de respuesta (RSM), se mejora la profundidad de penetración en la estructura del asiento, de un nivel Ppk de 0.54 a 1.50. Los factores analizados en el proceso de soldadura son la velocidad de soldadura, la potencia del láser y la posición focal en el eje Z. Finalmente, se emplea la técnica stepwise para optimizar los parámetros analizados, reduciendo el porcentaje de piezas fuera de especificación de 5.21% a 0.00% en el análisis a largo plazo.

*Palabras Clave:* Soldadura, DoE, RSM, Industria Automotriz, Capacidad de Procesos.

**Abstract**

The requirements for quality in industrial processes, specifically in the automotive industry, compel organizations to improve their processes to meet these requirements. The objective of this article is to present a proposal to analyze and improve penetration in the laser beam welding (LBW) process in automotive seat structures, using a TRUMPF TruDiode 3006 machine, through the Design of Experiments (DoE) approach using the response surface methodology (RSM), the penetration depth in the seat structure is improved from a Ppk level of 0.54 to 1.50. The factors analyzed in the welding process are welding speed, laser power, and focal position on the Z-axis. Finally, the stepwise technique is used to optimize the analyzed parameters, reducing the percentage of out-of-specification pieces from 5.21% to 0.00% in the long-term analysis.

*Keywords:* Welding, DoE, RSM, Automotive Industry, Process Capability.

## 1. Introducción

En la actualidad, los mercados demandan productos de alta calidad que cumplan con los requisitos del cliente y las normativas de seguridad (Hernández S. E. et al., 2024). En el ámbito de la seguridad en el sector automotriz, el objetivo principal es minimizar la ocurrencia y las consecuencias de los accidentes (Davies & Bastien, 2021). En este sentido, la ingeniería de la estructura del asiento desempeña un papel fundamental (Zhou et al., 2025). Un aspecto decisivo para garantizar una estructura adecuada de los asientos automotrices es la calidad de las uniones soldadas (Rivas et al., 2020).

La selección del proceso de soldadura adecuado debe considerar diversos factores, entre los que destacan la versatilidad del proceso, la soldabilidad del componente y el tipo de material de aporte empleado, entre otros. El proceso de soldadura por láser (LBW) ha sido cada vez más utilizado en aplicaciones industriales, no solo por sus ventajas técnicas en términos de materiales y propiedades del producto, sino también por sus beneficios en desempeño, producción y capacidad de manufactura (Zhang et al., 2022).

Una de las principales características de este proceso es su capacidad para incrementar la velocidad de fabricación de las piezas, así como controlar el aporte de calor, lo que se traduce en una reducción de la afectación térmica de los materiales. Al tratarse de un proceso automatizado, las variables pueden

*Autor para la correspondencia: go460622@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: ji524176@uaeh.edu.mx (Luisa Damaris Jimenez Castro), go460622@uaeh.edu.mx (Shania Yareth González Canales), omar_aguilar@uaeh.edu.mx (Omar Aguilar-Mejía), hertwin.minor@upaep.mx (Hertwin Minor-Popocatl), diana.sanchez@upaep.mx (Diana Sánchez-Partida)

**Historial del manuscrito:** recibido el 28/05/2026, última versión-revisada recibida el 28/07/2026, aceptado el 18/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18002

controlarse de tal manera que los experimentos sean repetibles y reproducibles. Las aplicaciones del proceso LBW son diversas, desde la micro-soldadura hasta la unión de aceros de gran espesor.

El uso de la micro-soldadura se observa en uniones internas de contacto; en baterías de litio, donde los parámetros deben controlarse estrictamente, especialmente debido a las condiciones geométricas de los componentes (Chianese et al., 2021). También se aplica en uniones disímiles, como aluminio–cobre, utilizadas en la industria de vehículos eléctricos, donde el principal reto es reducir la formación de fases inter-metálicas que pueden ser perjudiciales para el componente (Sinhmar & Mondal, 2024; Yan et al., 2022). En la industria automotriz, se emplea principalmente en cordones de soldadura a medida, ya que permite fabricar piezas con menor peso sin comprometer la calidad ni las propiedades mecánicas. En (Bagheri et al., 2021) se abordan los riesgos relacionados con la deformación que pueden presentar estas piezas si no se emplean procesos de soldadura adecuados.

En las empresas de clase mundial, el desempeño de un proceso dentro de una línea de producción se evalúa con base en su Índice de Capacidad Real ($C_{pk}$) (Salcher et al., 2023). A su vez, para el control y la mejora del $C_{pk}$, se utilizan metodologías de mejora de la calidad como el enfoque Six Sigma (Sharma & Chetiya, 2009), mediante una secuencia de etapas (Definir, Medir, Analizar, Mejorar) que permite identificar las causas de variabilidad, confirmarlas y establecer las acciones más adecuadas para alcanzar el objetivo planteado (Desai, Trushant et al., 2019).

Otro enfoque utilizado para el control de la variabilidad de los procesos es el denominado Shainin System™ (SS) (Pulido-Rojano et al., 2020). Tanto el enfoque Six Sigma como el Shainin System ofrecen alternativas que se han implementado con éxito en diversos procesos industriales (Trejos et al., 2010); sin embargo, el uso de metodologías híbridas, es decir, la combinación de ambos enfoques, permite obtener mejores resultados en comparación si se aplicaran de manera independiente (Khavekar et al., 2017).

En (Sharma & Chetiya, 2009), se presenta un estudio de caso en el que los enfoques de la metodología Six Sigma y el uso de herramientas propuestas en la metodología Shainin se emplean conjuntamente en las fases de análisis, mejora y control en una empresa de manufactura de engranes automotrices; los resultados muestran que la tasa de falla interna de los engranes se redujo de 10.2% a 0%. Por otro lado, en (Kumar et al., 2021) se presenta un enfoque híbrido que combina el Shainin System (SS) y el Proceso Analítico Jerárquico Difuso (AHP) para mejorar la productividad; el problema identificado es una alta tasa de rechazo en un modelo de pistón con una producción de 28,000 unidades en 6 meses, y los resultados reportados muestran una disminución del 12.6% en la tasa de rechazo.

En (Trimarjoko et al., 2019) se presenta la aplicación de la metodología SS en un proceso de manufactura de engranes rectos utilizados en la transmisión de potencia y torque en motores automotrices, donde se identifica como causa de variación la dimensión del orificio del engrane, cuya tasa de rechazo se establece en 6%, logrando una reducción de hasta 1.2% al final de la aplicación de la metodología.

En (Nguyen & Ho, 2025), se presenta el uso del método Taguchi para identificar los factores de control que permitan mejorar la resistencia a la tensión de aleaciones soldadas por láser. El parámetro dominante fue identificado como la potencia del láser, la cual contribuyó con el 64% de la variación.

El problema central en el presente trabajo es analizar y mejorar el índice de capacidad real del proceso de soldadura por láser utilizado en la fabricación de estructuras de asientos automotrices. La situación actual radica en un bajo nivel de profundidad de penetración de soldadura en juntas tipo T, donde el requisito mínimo de profundidad es de 1.20 mm.

La evidencia cuantitativa obtenida con base en 25 registros históricos indica que el índice de capacidad de proceso en la condición inicial es de Ppk = 0.54. Este valor es inferior al mínimo aceptable de 1.0 que exige la industria automotriz. Esta incapacidad del proceso se traduce directamente en que el 5.21% de las piezas fabricadas no cumplía con las especificaciones requeridas por el cliente. La solución del problema se resolverá utilizando un enfoque híbrido que integra el Diseño de Experimentos (DoE), el árbol de decisión del SS, herramientas de análisis y de control de la metodología Six Sigma. Asimismo, se identifican los parámetros que influyen en el nivel de penetración de la soldadura con el fin de optimizarlos y mejorar la capacidad real del proceso. Por lo cual, se implementa una metodología integrada que implementa el Diseño de Experimentos (DoE) a través de superficies de respuesta (RSM), el árbol de decisión del Shainin System y herramientas estadísticas de Six Sigma

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección II se describen los materiales y métodos, además de exponer la situación actual a mejorar; posteriormente, en la sección III se presentan los resultados y la discusión del estudio de caso; finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones del estudio.

## 2. Materiales y métodos

Para este estudio, se utilizó acero laminado en frío ZE 790 debido a su bajo contenido de carbono equivalente (EC), como se muestra en la Tabla 1. Este tipo de acero es ideal para aplicaciones de soldadura por puntos y por láser, ya que no presenta disminución en el límite de fluencia en las zonas afectadas por el calor. Además, la alta relación entre el límite de fluencia y la resistencia a la tensión proporciona condiciones óptimas para el proceso de conformado (Hofmann et al., 2009). El límite de fluencia del acero ZE 790 es de 800 MPa.

Tabla 1: Composición química del acero laminado en frío DE 790

| Material | C | Si | Mn | P | S | Cr |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ZE 790 | 0.05 | 0.03 | .52 | .005 | .001 | .05 |
| Material | Mo | Ni | Cu | Al | V | |
| ZE 790 | .01 | .04 | .10 | .028 | .006 | |

Para todos los experimentos, se utilizó una máquina de soldadura láser TRUMPF TruDiode 3006 con una potencia de 3000 W y una lente de 600 μm, operando en modo keyhole, con el fin de analizar el cordón de soldadura con mayor incidencia de profundidades de penetración por debajo de la especificación. La posición de las piezas fue controlada mediante dispositivos de sujeción neumáticos.

Los parámetros del proceso considerados en el estudio incluyen el análisis de los efectos de: A=velocidad de soldadura (mm/s), B=potencia del láser (W) y C=posición focal en el eje Z (mm), para determinar las condiciones

óptimas de la profundidad de penetración de la soldadura, cuyo requerimiento especificado es de 1.20 mm, en un panel lateral de acero con un espesor de 1.60 mm. La variable de salida medida, *y=profundidad de penetración,* se define como la conexión más corta entre las piezas unidas en una sección transversal, a través de la cual pueden transmitirse las fuerzas [20] como se muestra en la Figura 1. En la Figura 2 se muestra un diagrama esquemático de la profundidad de penetración de la soldadura de dos piezas tipo T basada de la micrografía real. En la Figura 2 se puede observar que la profundidad la soldadura en la pieza del lote seleccionado es de solamente 1.13 mm, antes de aplicar el proceso de mejora.

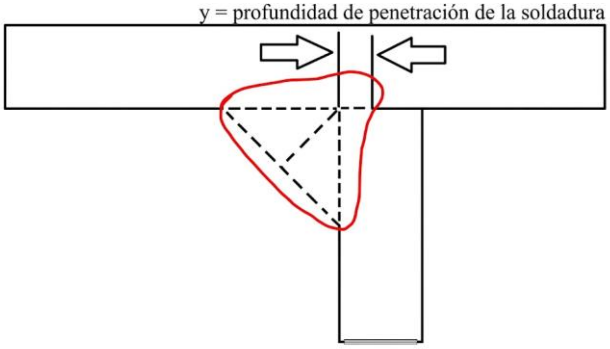



Figura 1. Definición de la variable de salida medida (*y*); profundidad de penetración de la soldadura.

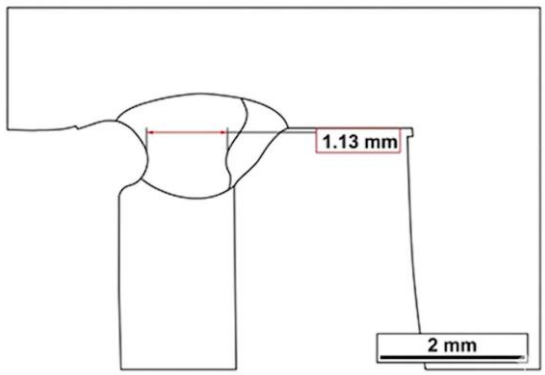



Figura 2. Profundidad de penetración de la soldadura antes de realizar el proceso de mejora, cuando Z=224.14 mm

La evaluación de la capacidad del proceso se realizó con un tamaño de muestra $n$ = 25, utilizando datos históricos de producción durante un periodo de tres meses, con el fin de determinar la situación actual y definir la línea base del proyecto. Los resultados muestran una capacidad de desempeño, antes de aplica la metodología de mejora, de $P_{pk}$=0.54. Para lograr el objetivo, el desarrollo metodológico se estructuró en tres etapas claramente diferenciadas que se describen a continuación:

- Etapa 1.- Diagnóstico y aislamiento de variables (Shainin System): Se utilizó un árbol de decisiones para clasificar y descartar de forma sistemática las fuentes de variación del proceso (componentes, sistema de medición o proceso) hasta aislar los tres factores críticos del equipo láser.
- Etapa 2.- Modelación y Optimización Cuantitativa (DoE y RSM): Una vez identificadas las variables, se construyó una matriz ortogonal de Diseño de Experimentos. Posteriormente, para el análisis de los datos se empleó MATLAB para programar los modelos de optimización y generar la superficie de respuesta (RSM), obteniendo matemáticamente el efecto cuadrático y las interacciones de los parámetros.
- Etapa 3.- Validación y Control (Six Sigma): Con los parámetros optimizados, se realizaron los gráficos de control estadístico (Gráficos I) y se determinaron los índices de capacidad (Ppk y Z Bench) para asegurar y cuantificar la mejora de la profundidad de penetración de la soldadura del ensamble tipo T a largo plazo.

## 3. Resultados y discusión

En la Tabla 2 se resumen los resultados del diseño de experimentos, utilizando una matriz ortogonal para evaluar todas las posibles combinaciones entre las variables de entrada. La decisión de incluir un punto central se determinó debido a la evidencia de que al menos uno de los factores (la velocidad) no sigue una relación lineal con la variable de salida.

Tabla 2. Matriz ortogonal del diseño de experimentos (RSM) $2^3$ con 1 punto central y 3 réplicas

| Tratamiento | A: Vel. (mm/seg.) | B: Potencia (Watts) | C: Z Posición (mm) | Replica 1 (mm) | Replica 2 (mm) | Replica 3 (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 22 | 2000 | 223.80 | 1.25 | 1.26 | 1.25 |
| 2 | 38 | 2000 | 223.80 | 1.08 | 1.29 | 1.18 |
| 3 | 22 | 3000 | 223.80 | 1.08 | 0.95 | 0.91 |
| 4 | 38 | 3000 | 223.80 | 1.30 | 1.24 | 1.25 |
| 5 | 22 | 2000 | 224.50 | 0.64 | 0.69 | 0.85 |
| 6 | 38 | 2000 | 224.50 | 0.58 | 0.44 | 0.37 |
| 7 | 22 | 3000 | 224.50 | 0.42 | 0.55 | 0.60 |
| 8 | 38 | 3000 | 224.50 | 0.22 | 0.44 | 0.18 |
| 9 | 30 | 2500 | 224.15 | 1.24 | 1.23 | 1.21 |

El análisis de residuos no muestra problemas de multicolinealidad en el modelo propuesto, con un coeficiente de determinación $R^2$= 94.64 y un $R^2$ predicho de 90.46% como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 3. Detalles de la técnica Stepwise (selección por pasos)

| | Paso 1 | | Paso 2 | | Paso 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Termino | Coef | P | Coef | P | Coef | P |
| Constante | 0.8778 | | 1.2267 | | 1.2267 | |
| C | -0.3358 | 0.000 | -0.3358 | 0.000 | -0.3358 | 0.000 |
| AA | | | -0.3925 | 0.000 | -0.3925 | 0.000 |
| AC | | | | | -0.0900 | 0.003 |
| S | | 0.201539 | | 0.158723 | | 0.133552 |
| R-sq | | 72.72% | | 83.76% | | 88.98% |
| R-sq(adj) | | 71.63% | | 82.40% | | 87.54% |
| R-sq(pred) | | 68.84% | | 80.66% | | 85.59% |

| | Paso 4 | | Paso 5 | | Paso 6 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Termino | Coef | P | Coef | P | Coef | P |
| Constante | 1.2267 | | 1.2267 | | 1.2267 | |
| C | -0.3358 | 0.000 | -0.3358 | 0.000 | -0.3358 | 0.000 |
| AA | -0.3925 | 0.000 | -0.3925 | 0.000 | -0.3925 | 0.000 |
| AC | -0.0900 | 0.001 | -0.0900 | 0.000 | -0.0900 | 0.000 |
| B | -0.0725 | 0.005 | -0.0725 | 0.003 | -0.0725 | 0.002 |
| AB | | | 0.0467 | 0.041 | 0.0467 | 0.033 |
| A | | | | | -0.0367 | 0.087 |
| S | | 0.113635 | | 0.105066 | | 0.0998874 |
| R-sq | | 92.37% | | 93.77% | | 94.64% |
| R-sq(adj) | | 90.98% | | 92.29% | | 93.03% |
| R-sq(pred) | | 89.00% | | 90.05% | | 90.46% |

[1] Términos candidatos: A, B, C, A*A, B*B, C*C, A*B, A*C y B*C; α para entrar = 0.15; α para eliminar = 0.15

Los resultados del experimento, utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM) para la caracterización; y utilizando la técnica stepwise, donde se respeta el modelo

jerárquico para mejorar la capacidad predictiva se muestran en la Tabla 3. En la Tabla 4 se indica que el modelo es estadísticamente significativo con un valor $p$ = 0.000. Utilizando la técnica de análisis de varianza (ANOVA) al proceso de soldadura, se determina un efecto cuadrático significativo para la velocidad y para las interacciones dobles, todas ellas con valores de probabilidad (valor $p$) menores a 0.05. Del análisis de resultados, se puede mencionar que el resultado de la prueba para analizar la falta de ajuste (lack of fit) es satisfactoria, con un valor $p > 0.05$ como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados de ANOVA

| Fuente | DF | SS | MS | Valor de $F$ | Valor de $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Modelo | 6 | 3.52272 | 0.58712 | 58.84 | 0.000 |
| Lineal | 3 | 2.86523 | 0.95508 | 95.72 | 0.000 |
| A | 1 | 0.03227 | 0.03227 | 3.23 | 0.087 |
| B | 1 | 0.12615 | 0.12615 | 12.64 | 0.002 |
| C | 1 | 2.70682 | 2.70682 | 271.29 | 0.000 |
| Cuadrático | 1 | 0.41082 | 0.41082 | 41.17 | 0.000 |
| A*A | 1 | 0.41082 | 0.41082 | 41.17 | 0.000 |
| Inter. Doble | 2 | 0.24667 | 0.12333 | 12.36 | 0.000 |
| A*B | 1 | 0.05227 | 0.05227 | 5.24 | 0.033 |
| A*C | 1 | 0.19440 | 0.19440 | 19.48 | 0.000 |
| Error | 20 | 0.19955 | 0.00998 | | |
| Falta de ajuste | 2 | 0.05568 | 0.02784 | 3.48 | 0.053 |
| Error puro | 18 | 0.14387 | 0.00799 | | |
| Total | 26 | 3.72227 | | | |

Tabla 5. Coeficientes (codificados) de la ecuación de regresión

| Término | Coef | Error estándar (SE Coef) | Valor t | Valor p | VIF |
|---|---|---|---|---|---|
| Constante | 1.2267 | 0.0577 | 21.27 | 0.000 | |
| A | -0.0367 | 0.0204 | -1.80 | 0.087 | 1.00 |
| B | -0.0725 | 0.0204 | -3.56 | 0.002 | 1.00 |
| C | -0.3358 | 0.0204 | -16.47 | 0.000 | 1.00 |
| A*A | -0.3925 | 0.0612 | -6.42 | 0.000 | 1.00 |
| A*B | 0.0467 | 0.0204 | 2.29 | 0.033 | 1.00 |
| A*C | -0.0900 | 0.0204 | -4.41 | 0.000 | 1.00 |

[2]R-sq = 94.64%; R-sq$_{(adj)}$ = 93.03%; R-sq$_{(pred)}$ = 90.46%

Los efectos principales que influyen en la penetración de la soldadura en la unión analizada se describen a continuación: a) el factor principal es el ángulo del haz de soldadura (posición en Z), b) el efecto cuadrático de la velocidad, y c) la interacción entre la velocidad y la potencia, entre otros. Con esta información, se confirma que los tres factores bajo estudio (velocidad, potencia y haz de soldadura) son significativos, y que el efecto cuadrático de las interacciones demuestra que este problema específico no puede optimizarse mediante el enfoque tradicional de prueba y error. La Ecuación 1 describe la caracterización de la variable de respuesta, la cual fue generada mediante el análisis (RSM) utilizando el software Matlab/Simulink, donde y representa la variable de respuesta.

$$\hat{y} = 1.2267 - 0.0367A - 0.0725B - 0.3358C - 0.3925A^2 + 0.0467AB - 0.0900AC \quad (1)$$

El modelo matemático fue validado físicamente con un 95% de confianza, demostrando que los datos siguen una distribución normal como se muestra en la Figura 3.

La interpretación cuantitativa de (1) revela los detalles críticos del comportamiento físico al aplicar la soldadura. El coeficiente negativo más grande corresponde a la variable C=-0.3358, lo que indica que al modificar la posición del robot es el factor más dominante para obtener la penetración optima. Asimismo, la magnitud negativa del término cuadrático de la velocidad ($A^2$ = -0.3925) demuestra que desviarse del punto óptimo de velocidad se reduce drásticamente la transferencia de calor al *keyhole*, penalizando la profundidad de la soldadura. De la misma forma, se realizó una corrida de comprobación, en la cual se obtuvo un desempeño del proceso que supera los requisitos solicitados por el cliente, con $P_{pk}$ = 1.50, para un periodo a largo plazo. El porcentaje de piezas fuera de especificación se redujo en un 100%, pasando de 5.21 % a 0.0003%, después de aplicar el proceso de mejora en la penetración de la soldadura, como se muestra en la Figura 3.

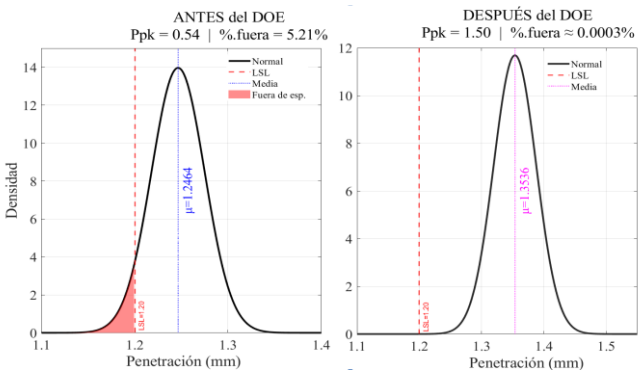



Figura 3. Análisis de capacidad del proceso antes y después de aplicar la metodología de mejora en el proceso de penetración de soldadura

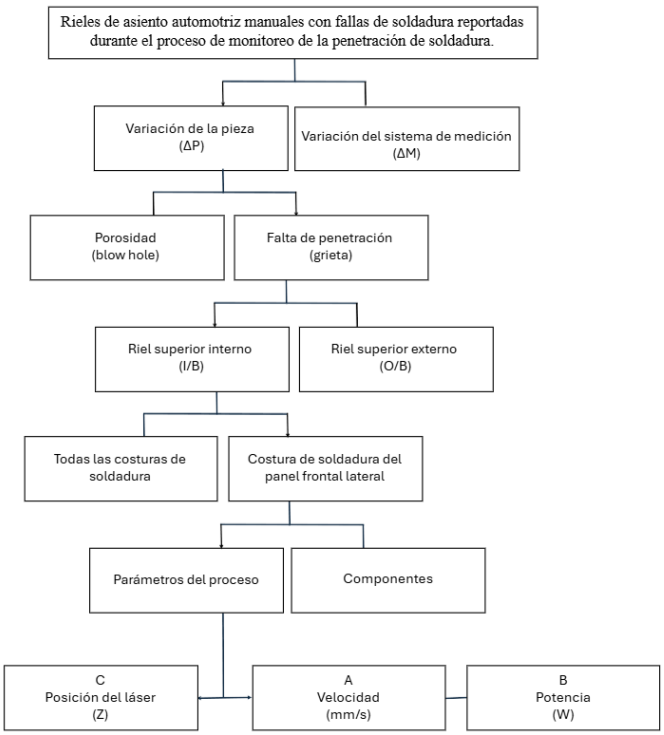



Figura 4. Árbol de solución del problema de penetración de soldadura de los asientos de automóviles

El análisis de causa raíz del problema se resume en el diagrama de bloques denominado "árbol solución" (metodología Shainin System™), para determinar factores que pudieran intervenir en el problema de falta de penetración en la soldadura de los rieles del asiento, se muestra en la Figura 4.

La Figura 5 muestra la superficie de respuesta obtenida mediante el modelo RSM (1), en la cual se observa que la

superficie presenta una curvatura pronunciada asociada al efecto cuadrático significativo de la velocidad ($A^2$), lo cual confirma que la relación entre la velocidad de soldadura y la penetración no es lineal. La zona de mayor penetración se concentra en valores intermedios de velocidad (28–32 mm/s) combinados con niveles elevados de potencia, alcanzando profundidades superiores a 1.35 mm, valor objetivo establecido para garantizar la integridad estructural de la unión tipo T en el riel del asiento automotriz.

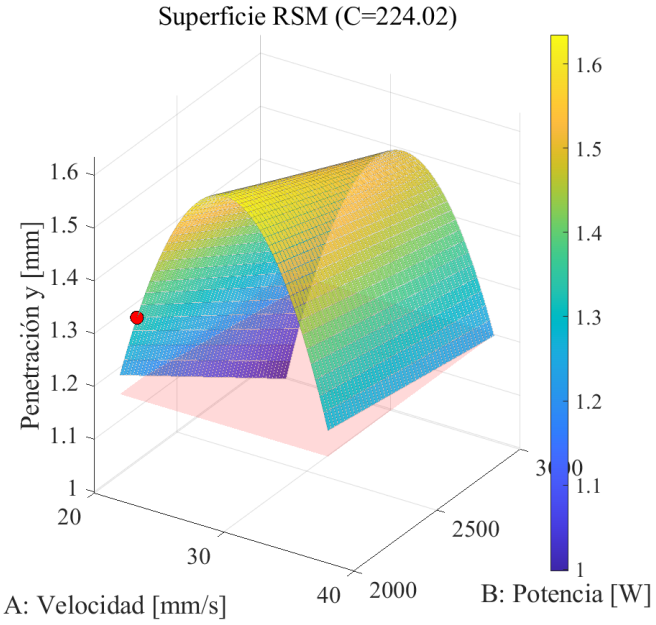



Figura 5. Superficie de respuesta de la profundidad de penetración de soldadura (y)

En la Figura 6 se presentan las gráficas de control de individuales correspondientes al proceso de penetración de soldadura en dos etapas: antes y después de la implementación de la metodología de mejora.

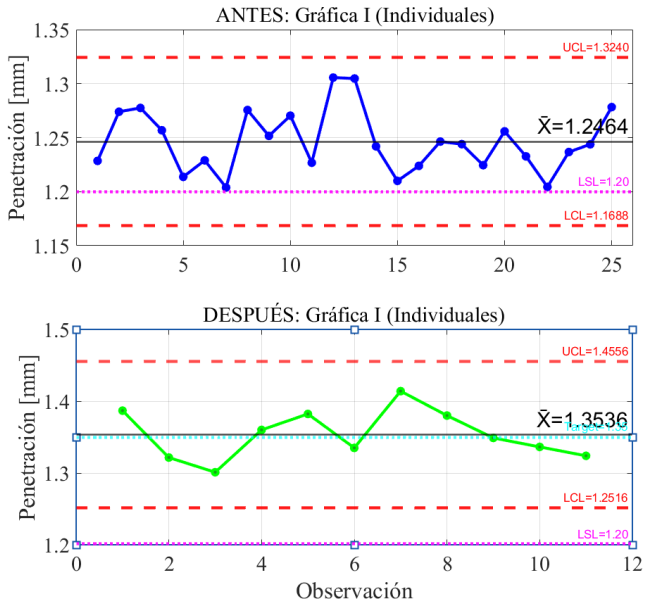



Figura 6. Gráficas de control de individuales (I) de la profundidad de penetración de soldadura antes y después de aplicar la metodología de mejora RSM.

En la condición inicial (Antes), se observa que la media del proceso se sitúa en $\bar{X}$ = 1.2464 mm, después de la mejora del proceso la media se desplaza a $\bar{X}$ = 1.3536 mm, lo que confirma la estabilización del proceso tras la optimización de los parámetros mediante RSM

La Tabla 6 resume los indicadores de capacidad del proceso antes y después de la aplicación de la metodología RSM. Los resultados demuestran una mejora sustancial en todos los índices de desempeño. El Z *Bench* global aumentó de 1.62 a 4.50 sigma, lo que se traduce en una reducción de las partes por millón defectuosas estimadas (DPMO) de 52,118 a tan solo 3, es decir, una disminución del 99.99%.

Tabla 6. Comparación de la caracterización del proceso y estadísticas de capacidad de la profundidad de penetración de soldadura antes y después de aplicar la metodología de mejora RSM.

| Caracterización del proceso | Antes | Después | Cambio |
|---|---|---|---|
| Total de datos (N) | 25 | 11 | |
| Tamaño del subgrupo | 1 | 1 | |
| Media | 1.2464 | 1.3536 | 0.10724 |
| Desviación Estándar (global) | 0.028560 | 0.034139 | 0.0055789 |
| Desviación Estándar (interna) | 0.030659 | 0.028369 | -2.29E-03 |
| **Estadísticas de capacidad** | **Antes** | **Después** | **Cambio** |
| Capacidad real (global) | | | |
| Pp | 2.33 | 1.95 | -0.38 |
| Ppk | 0.54 | 1.50 | 0.96 |
| Z Bench | 1.62 | 4.50 | 2.88 |
| % fuera de esp. (obs.) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| % fuera de esp. (esp.) | 5.21 | 0.00 | -5.21 |
| PPM (DPMO). (obs.) | 0 | 0 | 0 |
| PPM (DPMO). (esp.) | 52118 | 3 | -52114 |
| Capacidad potencial (interna) | | | |
| Cp | 2.17 | 2.35 | 0.18 |
| Cpk | 0.50 | 1.81 | 1.30 |
| Z Bench | 1.51 | 5.42 | 3.90 |
| % fuera de esp. (esp.) | 6.51 | 0.00 | -6.51 |
| PPM (DPMO). (esp.) | 65086 | 0 | -65086 |

Utilizando el módulo de Estadística y Machine Learning de Matlab, donde se establece numéricamente el objetivo para la variable de salida *y*, definida como profundidad de la soldadura ($y$ = 1.35 mm), para minimizar los defectos físicos que puede presentarse como grietas y porosidades (Khan et al., 2013).

Esta información respalda la decisión de ajustar los parámetros del proceso, desplazando la posición del robot de 224.15 mm a 223.8 mm. Adicionalmente, el rango de velocidad fue modificado debido a su efecto cuadrático sobre la variable de salida, pasando de (28–38) mm/s a (28–32) mm/s. Para analizar los cambios en el proceso con base en los coeficientes de la ecuación de regresión se realizó una corrida de validación con los parámetros actuales y los propuestos

La consistencia de la mejora se refleja en los indicadores de la Tabla 6. El desplazamiento de la media de penetración de 1.2464 mm a 1.3536 mm, acompañado de la optimización de las varianzas, elevó la capacidad real del proceso (Ppk) de 0.54 a 1.50. En términos de la metodología Six Sigma, el proceso transitó de un nivel de calidad deficiente (1.62 sigma global) a un nivel de calidad aceptable (4.50 sigma), mitigando de forma casi total el riesgo de uniones defectuosas al pasar de 52,118 DPMO a solo 3 DPMO.

En la Figura 7 se muestra el diagrama esquemático de la unión de las dos piezas, después de aplicar el proceso de mejora en el proceso de soldadura. El problema de penetración de soldadura en los rieles de los asientos de automóviles se mitigo utilizando los parámetros que dio como resultado el análisis de la superficie de respuesta DOE implementada en Matlab/Simulink®.

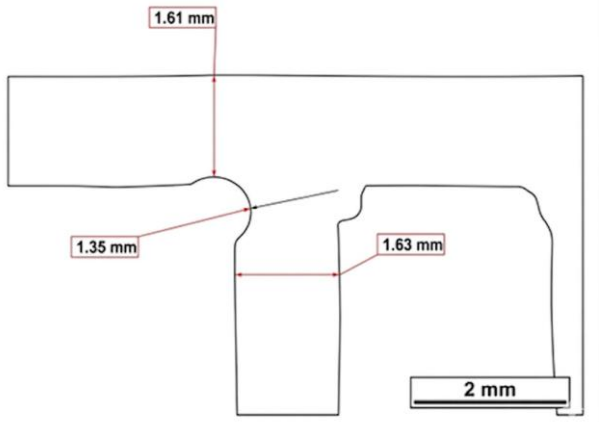



Figura 7. Profundidad de penetración después de la optimización del proceso (1.35 mm), utilizando la ecuación de regresión Ec. (1) del modelo RSM (Z=224.02)

## 4. Conclusión

En relación a los resultados obtenidos en el estudio de caso donde se presenta una solución técnica al problema del proceso, de soldadura donde las piezas fabricadas no cumplían con las especificaciones requeridas por el cliente, en la industria automotriz y en otras industrias con aplicaciones similares, se demuestra que la robustez de la metodología de diseño de experimentos de superficie de respuesta (RSM), se puede utilizar para optimizar los parámetros del proceso y cumplir con las especificaciones del cliente.

El estudio de caso cumple con los objetivos planteados, obteniendo las siguientes conclusiones: a) La profundidad de penetración de la soldadura en uniones de acero laminado en frío ZE 790 depende de la posición focal del haz de soldadura, que depende del efecto cuadrático de la velocidad del proceso y de la energía aplicada durante la unión, lo que justifica la necesidad de utilizar el Diseño de Experimentos (DoE) mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM) para su optimización y el cumplimiento a largo plazo de las especificaciones del proceso; b) utilizando la ecuación de regresión, el resultado del DoE, se puede disminuir el desperdicio generado por fallas en la penetración de la soldadura, el cual se redujo de 5.21% a 0.00%; y c) los parámetros óptimos del proceso que se obtuvieron con la metodología de mejora utilizada, garantizan una profundidad de penetración de soldadura, y alcanzado una capacidad del proceso de $P_{pk}$ = 1.50.

La implementación de una metodología integrada es determinante para el éxito técnico del estudio; la articulación del diagnóstico Shainin, la modelación matemática mediante la técnica RSM del DoE, y el monitoreo mediante Six Sigma, demuestra que la integración de estas herramientas permite alcanzar niveles de optimización superiores a los obtenidos al aplicarlas de manera independiente.

## Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron grammarly para la corrección gramatical y mejorar la redacción del texto. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

## Referencias

Bagheri, B., Abbasi, M., & Hamzeloo, R. (2021). Comparison of different welding methods on mechanical properties and formability behaviors of tailor welded blanks (TWB) made from AA6061 alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *235*(12), 2225-2237. DOI: 10.1177/0954406220952504

Chianese, G., Franciosa, P., Nolte, J., Ceglarek, D., & Patalano, S. (2021). Characterization of Photodiodes for Detection of Variations in Part-to-Part Gap and Weld Penetration Depth During Remote Laser Welding of Copper-to-Steel Battery Tab Connectors. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, *144*(071004). DOI: 10.1115/1.4052725

Davies, H. C., & Bastien, C. (2021). An approach for the crash safety assessment of smaller and lightweight vehicles. *Transport Policy*, *105*, 12-21. DOI: 10.1016/j.tranpol.2021.02.009

Desai, Trushant, Deshpande, Vivek, & Mandaliya, Vinit. (2019). Strengthening Six Sigma improvement methodology through Shainin analytical techniques. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, *05*(01). DOI: 10.18231/2454-9150.2019.0295

Hernández S. E., Mondragón, N. A., García, V. G., & González, P. G. (2024). *Afectación de los parámetros operativos de la soldadura láser para la determinación de la morfología del cordón de soldadura sobre placas de aluminio grado automotriz. Metodologías*. *1*(2), 90-95.

Hofmann, H., Mattissen, D., & Schaumann, T. W. (2009). Advanced Cold Rolled Steels for Automotive Applications. *Steel Research International*, *80*(1), 22-28. DOI: 10.2374/SRI08SP113

Khan, M. M. A., Romoli, L., & Dini, G. (2013). Laser beam welding of dissimilar ferritic/martensitic stainless steels in a butt joint configuration. *Optics & Laser Technology*, *49*, 125-136. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.12.025

Khavekar, R., Vasudevan, H., & Modi, B. (2017). A Comparative Analysis of Taguchi Methodology and Shainin System DoE in the Optimization of Injection Molding Process Parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *225*(1), 012183. DOI: 10.1088/1757-899X/225/1/012183

Kumar, A., Singh, K., Singh, K., Thakur, K., Singh, H., & Singh, J. (2021). Product performance optimization in an automotive manufacturing plant using shainin DOE tools: A case study. *Mater. Today Proc.*, *50*, 1679-1682. Scopus. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.150

Nguyen, H., & Ho, J.-R. (2025). *Enhancement of mechanical properties and microstructure characteristics in laser transmission joining of C1100/glass weld through Taguchi GRA and PCA multi-response optimization*. Research Square. DOI: 10.21203/rs.3.rs-8312371/v1

Pulido-Rojano, A. D., Ruiz-Lázaro, A., Ortiz-Ospino, L. E., Pulido-Rojano, A. D., Ruiz-Lázaro, A., & Ortiz-Ospino, L. E. (2020). Improving the processes of production through risk management and statistical tools. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, *28*(1), 56-67. DOI: 10.4067/S0718-33052020000100056

Rivas, D., Quiza, R., Rivas, M., & Haber, R. E. (2020). Towards Sustainability of Manufacturing Processes by Multiobjective Optimization: A Case Study on a Submerged Arc Welding Process. *IEEE Access*, *8*, 212904-212916. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3040196

Salcher, F., Finck, S., & Hellwig, M. (2023). Automated Process Capability Analysis for Product Quality Improvements. *2023 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1-9. DOI: 10.1109/ICE/ITMC58018.2023.10332307

Sharma, S., & Chetiya, A. R. (2009). Simplifying the Six Sigma Toolbox through Application of Shainin DOE Techniques. *Vikalpa*, *34*(1), 13-30. DOI: 10.1177/0256090920090102

Sinhmar, S., & Mondal, K. (2024). Effect of variation in power input on dissimilar materials (Cu-Al) laser welding for battery manufacturing. *Materials Today Communications*, *39*, 109362. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109362

Trejos, E. C., Varela, P. D. M., & Urquijo, C. Z. (2010). Comparación de las metodologías SHAININ y TAGUCHI del diseño experimental en un ingenio azucarero del valle del cauca. *Scientia et Technica*, *2*(45). DOI: 10.22517/23447214.317

Trimarjoko, A., Saroso, D. S., Purba, H. H., Hasibuan, S., Jaqin, C., & Aisyah, S. (2019). Integration of nominal group technique, Shainin system and DMAIC methods to reduce defective products: A case study of tire

manufacturing industry in Indonesia. *Management Science Letters*, *9*(Spceial Issue 13), 2421-2432. Scopus.
DOI: 10.5267/j.msl.2019.7.013

Yan, F., Qin, Y., Tang, B., Zhou, Y., Gao, Z., Hu, Y., Hu, C., Xiao, Z., Xiao, Z., & Wang, C. (2022). Effects of beam oscillation on microstructural characteristics and mechanical properties in laser welded steel-copper joints. *Optics & Laser Technology*, *148*, 107739.
DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.10773

Zhang, W., Mao, Y., Yang, P., Li, N., Ke, L., & Chen, Y. (2022). Effect of Welding Speed on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 2198 Al-Cu-Li Alloy Joints. *Materials*, *15*(3).
DOI: 10.3390/ma15030969

Zhou, X., Gao, T., & Long, J. (2025). Lightweight optimization design for automotive front seat frame based on comprehensive Sobol global sensitivity analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *239*(18), 7321-7340.
DOI: 10.1177/09544062251352410