

Implementación de metodología Seis Sigma para la solución de bolas de soldadura en tablillas electrónicas

Implementation of Six Sigma methodology for the solution of solder balls in electronic boards

Gustavo Vázquez Silva¹✉, Luis Alberto Rodríguez-Picón¹, Roberto Romero López¹

¹Instituto de Ingeniería y Tecnología | Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)

RESUMEN

En este artículo se aborda la investigación realizada en una planta de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, donde se trabajan diferentes modelos de tablillas electrónicas para el control de diversas partes y accesorios automotrices. Ahí se identificó una oportunidad de mejora, ya que se estaban generando defectos de bolas y burbujas de soldadura en las tablillas, creando un daño latente y aumento en los costos de producción. Se implementó la metodología Seis Sigma y su herramienta DMAIC en seis diferentes diseños de experimentos con una máquina de inspección de rayos X y un software que procesa las imágenes. Se modificaron diversos parámetros en la etapa de soldeo y, finalmente, se encontró que las tablillas de un proveedor chino causaban el defecto debido a la rugosidad en orificios (*through holes*), pues ahí quedaba flux atrapado y se generaban las bolas de soldadura.

PALABRAS CLAVE: tablillas electrónicas; bolas de soldadura; *through hole*; DMAIC.

ABSTRACT

This article deals with the research carried out in a plant in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico, where different models of electronic boards are used to control various automotive parts and accessories. There, an opportunity for improvement was identified, since ball defects and solder bubbles were being generated in the slats, creating latent damage and an increase in production costs. The Six Sigma methodology and its DMAIC tool were implemented in six different experimental designs with an X-ray inspection machine and image processing software. Various parameters were modified in the welding stage and, finally, it was found that the boards from a Chinese supplier caused the defect due to the roughness in the through holes, since flux was trapped there and solder balls were generated.

KEYWORDS: electronic boards; solder balls; through hole; DMAIC.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Gustavo Vázquez Silva
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,
Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero,
C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: al199148@alumnos.uacj.mx

Fecha de recepción: 12 de mayo de 2022. **Fecha de aceptación:**
10 de noviembre de 2022. **Fecha de publicación:** 1 de diciembre
de 2022.



I. INTRODUCCIÓN

Una tablilla electrónica es la parte principal del funcionamiento de diferentes dispositivos industriales y domésticos y, actualmente, algunos aparatos dependen de ellas (estufas, hornos de microondas, lavadoras, televisiones, computadoras, etc.) [1]. Por medio de sus circuitos, estas tablillas permiten que las funciones del dispositivo se ejecuten correctamente de acuerdo a cómo y para qué fueron diseñadas, tomando en cuenta la soldadura correcta de todos sus componentes [2].

Los procesos de soldadura son comúnmente utilizados en la industria electrónica para unir los componentes a la PCB (Printed Circuit Board). Un proceso común es el de soldadura de ola, en cual intervienen varios parámetros de contacto de los herramientas de soldadura a la PCB [3], que son importantes y continuamente monitoreados [4].

Actualmente, en una planta de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, se trabajan diferentes modelos de tablillas para el control de diversas partes y accesorios automotrices. Precisamente, en la fase de soldadura se identificó un área de mejora, ya que durante el proceso de soldeo de tablillas electrónicas, específicamente en las máquinas soldadoras selectivas, se estaban generando defectos de bolas y burbujas de soldadura entre las terminales de los componentes y los *orificios pasados* (*through holes*) de la PCB, creando un daño latente en esta, ya que se puede fracturar la soldadura fácilmente y generar un problema a corto o mediano plazo. Estos defectos pueden ocasionar un gran problema a la empresa, pues las tablillas que se producen en esta planta son de seguridad nivel 3, de alta confiabilidad (críticos, vitales).

El modelo en donde se está teniendo este problema es en la tablilla que controla los sensores del ABS (Anti-lock Braking System) de los automóviles y las bolsas de protección para los tripulantes en caso de accidentes. Por esta razón, las tablillas deben tener una confiabilidad máxima, ya que su mal funcionamiento pone en riesgo la vida de las personas. Dada esta problemática, resulta necesaria la consideración de metodologías clave que permitan mejorar la condición actual del proceso, entre ellas Seis Sigma, la cual fue propuesta en los años ochenta por Bill Smith para controlar y disminuir la variación o eliminar las fallas y defectos en un producto, proceso o servicio al cliente o consumidor [5].

La meta de Seis Sigma es alcanzar o estar por debajo de 3.4 defectos por millón [6]. Con el término *defecto* se define cualquier falla o discrepancia que tenga el producto o servicio que no cumpla con los requerimientos del cliente o consumidor [7].

Seis Sigma ha ido avanzando y transformándose desde su aplicación solamente como herramienta de calidad a incluirse dentro de diferentes departamentos clave de algunas empresas [7]. Esta metodología tiene como principal aportación que todos los procesos cumplan con los requisitos que el cliente pide, asegurando que la calidad y desempeño cumplan con los estándares de Seis Sigma. Dentro de los parámetros establecidos, en el ámbito organizacional fueron Motorola, General Electric y Honeywell quienes popularizaron este recurso, logrando excelentes resultados en sus procesos [8].

DMAIC, una de las herramientas de Seis Sigma, es el acrónimo de una metodología de cinco pasos: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Es un proceso de mejora, sistemático, científico y basado en hechos [9]. Aunque existen otros recursos, como DMADOV (Definir, Medir, Analizar, Diseñar, Optimizar y Verificar) y PDCA-SVDA (Planificar, Ejecutar, Verificar y Actuar-Estandarizar, Ejecutar, Verificar y Actuar) [9], Seis Sigma ha sido utilizada en diversas aplicaciones, por ejemplo, en la reducción de costos en pequeñas y medianas empresas [10] para mejorar la competitividad y desempeño.

Por otra parte, el uso de Seis Sigma ayudó en el mejoramiento y eficiencia en troqueles de alta velocidad [11], así como en el servicio a usuarios en los laboratorios de una institución de educación superior con el fin de agilizar la atención y disminuir el tiempo que pierden los alumnos en espera de atención [12].

Por otra parte, [13] consideró esta metodología para reducir la variación generada por el producto terminado, ya que se incumplía con las pruebas de calidad. Seis Sigma también fue utilizada para la mejora en una línea de ensamble de bombas de gasolina, obteniendo excelentes resultados en la disminución de tiempos de proceso [14].

En [15] se utilizó Seis Sigma, en conjunto con Lean Seis Sigma, para ayudar a las pequeñas y medianas empresas a mejorar la calidad, la eficiencia y la reducción de costos para ser más competitivas frente a las grandes

compañías. Otra cualidad importante en la que se enfocan las empresas de clase mundial es el aspecto de ser sustentables, reduciendo al mínimo el impacto ambiental negativo que generan sus procesos, dando un equilibrio y cuidando la naturaleza y a sus trabajadores por igual. De la misma manera que en el ejemplo anterior, [14] usó Seis Sigma para el análisis y mejora de un proceso de ensamble de un automóvil de energía potencial.

Asimismo, [16] empleó esta metodología para hacer más eficiente el control en el almacén de productos terminados de la empresa Bakus, que se dedica a la elaboración de bebidas, con excelentes resultados. En otros casos, se usó Seis Sigma para mejorar la producción de lavavajillas y eliminar las causas que originan pérdidas e ineficiencia en el proceso [17], así como en la estandarización de la producción de café de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) en Colombia, ya que se tenía un rendimiento de 64.81 % y con la aplicación de esta herramienta se logró reducir los desperdicios y estandarizar los procesos para hacer más eficientes los tiempos de producción [18].

Seis Sigma fue utilizada también en una empresa que fabrica *blocks* de cemento, con la finalidad de implementar un sistema de calidad que ayude a disminuir errores, mermas y retrabajos que incrementaban los costos de producción [19], así como en una empresa automotriz para reducir costos en el proceso de barrenación o perforación de discos automotrices, la cual tenía un porcentaje de rechazo fuera de especificación y en el que se requirió meter en control esa deficiencia para hacer más competitiva la compañía y, sobre todo, evitar la pérdida de clientes [20].

Específicamente, para el caso de estudio de interés, el equipo en donde se originó la problemática es una soldadora selectiva de ola, que consta de tres bloques de proceso: área de flux, área de precalentado y área de soldado o de soldadura. A continuación, se explica en qué consiste cada una de ellas y su función.

Área de flux: Tiene dos clasificaciones: *clean* y *no clean*. El flux *no clean* es el que más se utiliza en procesos de producción para la limpieza de impurezas en las tablillas electrónicas [21]. La fórmula del flux está diseñada para limpiar las áreas y componentes a soldar removiendo los óxidos metálicos y ayudando a que la soldadura tenga una mayor fluidez y una mejor unión inter-

metálica [22]. Los activadores del flux *no clean* son ácidos orgánicos débiles, que son menos agresivos y corrosivos que los de un flux lavable. Por medio de brochas y de un mecanismo neumático, las brochas están sumergidas en una tina llena de flux y cuando sube por medio de mecanismos (cilindros neumáticos) toca la PCB e impregna la tablilla y los pines que se van a soldar para limpiar impurezas.

Área de Precalentado: El precalentamiento puede ser entendido de acuerdo con la norma de la Asociación de Industrias de Conexiones Electrónicas (IPC), como un paso importante y necesario para disminuir la generación de residuos (solventes volátiles) antes de llegar al proceso de soldadura y también ayuda a disminuir un choque térmico entre componentes y la soldadura líquida [23]. Varios estudios han comprobado que un proceso de precalentado correcto es decisivo e indispensable para que la soldadura fluya entre el orificio pasado de la tablilla y los componentes que se van a soldar, obteniendo una correcta unión intermetálica en ambos lados de la tablilla (superior e inferior). El calentador por infrarrojo está construido de manera que una vez definida la anchura no usada del calentador puede ser desactivada. La combinación de los sistemas infrarrojo y de convección ofrece una perfecta transferencia de calor [22].

Área de Soldadura: La unión por soldadura se refiere a la unión entre dos o más componentes, generalmente usando soldadura de estaño, cobre y/o plata como mejores opciones, ya que la de plomo es altamente contaminante. En las máquinas soldadoras de ola, el proceso consiste en unas boquillas inmersas en una tina de soldadura que emergen de esta por un sistema de servos, subiendo hasta llegar a hacer contacto con la tablilla y los componentes a soldar. Esta acción en la que fluye la soldadura hacia el lado superior de la tablilla se le conoce como proceso de capilaridad, logrando una unión sólida y confiable.

En la composición eutéctica (mezcla de dos componentes con punto de fusión o vaporización mínimo), la aleación de 96.5 Sn-3.5 Ag (estaño-plata) es generalmente la más usada de las que son libres de plomo. Se les emplea en uniones de alta temperatura porque generan una gran mojabilidad y resistencia. La combinación de plata y estaño forma aleaciones que son estables e insensibles a reacciones de electromigración [24], como se muestra en la [Figura 1](#).

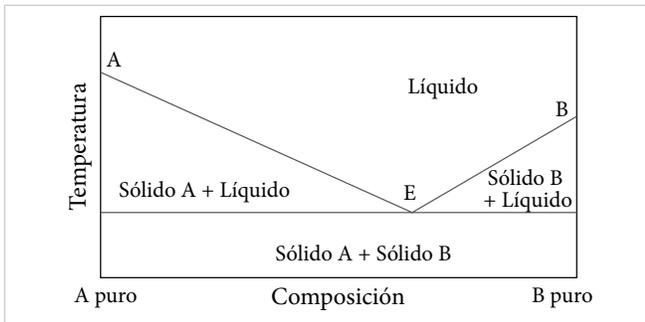


Figura 1. Punto de fusión de la soldadura [25].

Un sistema de servomotores sube una tina llena de soldadura fundida a 325 °C y, a su vez, contienen los herramientas de soldadura que son los que hacen contacto con la superficie de la PCB, formando uniones intermetálicas por el principio de capilaridad entre la PCB y los componentes electrónicos. Así, “el proceso de capilaridad es la acción de que un líquido fluya por espacios pequeños” [26]. En esta área se deben tener controladas y monitoreadas las velocidades con las que suben los herramientas de soldadura para evitar problemas de daño a la PCB o defectos del soldeo.

Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de soldadura se generan defectos de bolas de soldadura y burbujas de aire entre las terminales de los componentes y los *through hole* de la PCB, creando un daño latente, ya que la soldadura se puede fracturar fácilmente. Un problema para las bolas con diámetro mayor a 0.5 micras es que se puede generar un corto al moverse, dado que quedan atrapadas entre las terminales de los componentes electrónicos. Otro de los problemas que generan las burbujas en las tablillas electrónicas es que no dejan que se tenga una unión intermetálica correcta, pudiendo generar interferencia eléctrica, cortos o fracturas en la soldadura que impiden una buena conducción de electricidad.

Por otra parte, existen normas por las que se rigen las industrias de manufactura de tablillas electrónicas a escala mundial y que indican el nivel de error o tolerancia con las que se debe trabajar definidas por el IPC. Estas normas rigen a las empresas de clase mundial, donde se indican los criterios de aceptación en los procesos de soldadura. Bajo estas especificaciones, la producción de las tablillas está generando pérdidas importantes dado que el precio de esta con proceso de soldado es de 40 dólares estadounidenses. Dado que se ha tenido alrededor de 16 a 20 piezas defectuosas por cada 24 horas, eso significa una pérdida de 560 a 800 dólares diarios en una sola línea

de producción, haciendo que la proyección de costo al año en defectos sea de 193 200 a 276 000 dólares.

El objetivo de este artículo es presentar la aplicación de Seis Sigma en el problema descrito, con la intención de cumplir con los requerimientos del cliente y los criterios de IPC 610, en donde mencionan los tipos de defectos y algunas de las variables de proceso recomendadas para solucionarlos. Se reseña también cómo se emplearon diversas herramientas de la metodología en las diferentes fases del proceso al tomar en cuenta parámetros de precalentado, velocidad y contacto de soldadura.

II. METODOLOGÍA

La metodología está basada en cada uno de los bloques y herramientas de DMAIC, como se muestra en la Figura 2.

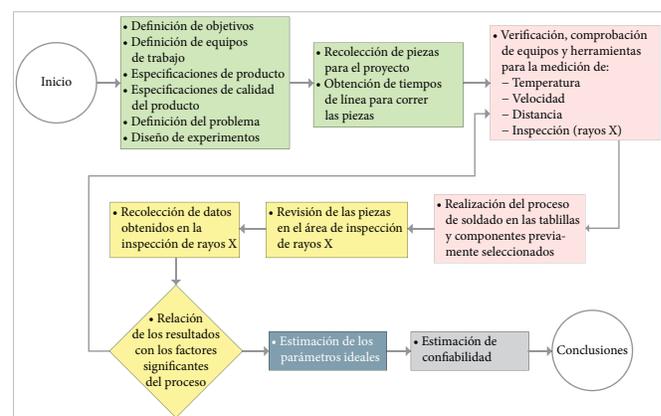


Figura 2. Diagrama de bloques de la metodología empleada.

La metodología Seis Sigma se enfoca en los requerimientos y expectativas del cliente (voz del cliente):

- a) ¿Qué quiere el cliente?
- b) ¿Qué necesita el cliente?
- c) ¿Qué demanda el cliente?
- d) ¿Qué estimula el cliente?
- e) ¿Qué espera el cliente?

Seis Sigma utiliza datos concretos y confiables y usa un método robusto y basado en un sistema de pasos que se ajusta a un método o sistema para solucionar problemas y la mejora de procesos [27].

Asimismo, la calidad está enfocada en la completa satisfacción del cliente y se puede aplicar al producto, servicio o a la organización. La calidad total pretende obte-

ner beneficios para todos los miembros de la empresa, haciendo alusión a la mejora continua como parte de la metodología en que se basa Seis Sigma [28].

Para llevar a cabo este proyecto, el equipo decidió que las pruebas y los diseños de experimentos se llevaran a cabo en una sola línea de producción de las tres existentes en la planta establecida en Ciudad Juárez, en la que este problema debía ser solucionado por la relevancia que tiene en aspectos de calidad, reducción de *scrap* y riesgos de accidentes.

Los materiales que empleados para llevar a cabo los diseños de experimentos seleccionados de acuerdo a las especificaciones de calidad, son los mismos que se usan diariamente en el proceso de producción. El total de las siguientes cantidades de material con las que se contó para hacer los seis diferentes diseños de experimentos fue una de las limitaciones que se tuvieron dentro de este proyecto, ya que los experimentos y los tamaños de muestra fueron determinados por el material y el tiempo de línea disponibles después de cumplir con la planeación de producción requerida por el cliente:

- 4500 tablillas electrónicas con componentes de SMD (Surface Mounting Device) previamente soldados.
- 4500 relevadores NEXEM EX2-N10, voltaje de funcionamiento de 7-12 voltios, capacidad de memoria flash de 100 KB.
- 4500 relevadores NEXEM EX1-N6, voltaje de funcionamiento 4 voltios, capacidad de memoria de flash de 100 KB.
- Flux Cobar Europa BV base alcohol al 96 %.
- Máquina soldadora selectiva INERTEC MLS 2040, voltaje 110/208, año 2007, de manufactura alemana.
- Máquina de inspección de rayos X, modelo X7056-ll, para la revisión de las tablillas de electrónicas. La máquina cuenta con un software con las imágenes de las PCB que se producen en la línea de producción y hace un comparativo al momento de las revisiones. Asimismo, tiene un sistema de medición que es aplicado a los hallazgos encontrados en el comparativo que hace la máquina. Este equipo fue solicitado bajo estas especificaciones por la empresa para que pudiera llevar a cabo estas revisiones y evitar la toma de decisiones a nivel operativo, ya que los modelos que en esta línea se producen son de nivel 3 de seguridad y además es certificado y calibrado por un proveedor externo.

- Computadora Lenovo Thinkpad T560 para utilizar programas computacionales requeridos.
- Programa Microsoft Excel para el registro y control de datos.
- Programa estadístico Minitab para el análisis de diseño experimental.

Los pasos que se siguieron en cada una de las secciones de la metodología se muestran a continuación:

Definir: Definición del problema, de equipos de trabajo y de especificaciones de producto; diseño de experimentos; recolección de piezas para el proyecto; obtención de tiempos de línea para correr los experimentos.

Medir: Verificación, comprobación de equipos y herramientas para medición de temperatura, velocidad, distancia e inspección de rayos X; ejecución del proceso de soldado de tablillas y componentes manuales previamente seleccionados.

Analizar: Revisión de las piezas en rayos X; recolección de datos obtenidos de la inspección de rayos X; relación de resultados con los factores significantes del proceso.

Mejorar: Estimación de parámetros ideales.

Controlar: Modificación del FMEA (Failure Modes and Effect Analysis) y el plan de control.

Se estableció una lista de comprobación (*check list*) de temperaturas de precalentado diario y turno por turno, y además se implementó un documento con especificaciones de rugosidad para el departamento de *incoming*.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados de los diferentes esquemas de experimentación que se llevaron a cabo para determinar los valores ideales de temperatura de precalentado. En la etapa 1 (Definir) se conformó un equipo de trabajo con la inclusión de representantes de todos los departamentos que son parte del proceso para la producción del producto terminado. Asimismo, el equipo definió objetivos, alcances, limitaciones, tareas y responsabilidades de cada miembro del grupo; se determinó cuál es el defecto o problema (bola de soldadura) y las posibles variables causantes de este. Se eligió lo más significativo de acuerdo con un diagrama de Ishikawa. Cabe mencionar que el principal problema

que se tuvo fue la disponibilidad de tiempo de los diferentes departamentos.

A continuación, se determinó lo siguiente: el tamaño de muestra para llevar a cabo los experimentos; los encargados del armado de las piezas; los tiempos de línea para las corridas, con las restricciones respectivas de acuerdo con el plan de producción, y la identificación de las piezas de acuerdo con posición, hora, día y parámetros de la corrida por medio de una etiqueta individual.

En la fase de Medir se revisaron todas las máquinas que se utilizarían, así como sus parámetros, etiquetas de calibración y su variabilidad, todo esto por el departamento de calibración y metrología. Aquí se encontró que el equipo de soldadora selectiva, específicamente en el área de precalentado, no estaba siendo monitoreado constantemente porque en su momento se pensó que no debería estar sujeto a un sistema de revisión periódica, pero, en acuerdo con todo el equipo del proyecto, se decidió que se implementará su revisión mensualmente para llevar un control de esta área y validar los parámetros de proceso. Un solo equipo hizo las revisiones de los experimentos, considerando una máquina de rayos X que fue calibrada y revisada por un proveedor externo, el cual colocó la etiqueta de calibración liberada.

La cantidad de defectos en este proceso es pequeña, sin embargo, el costo por pieza defectuosa es importante dado que ronda en los 40 dólares. El número de defectos por día es de 15 a 20 piezas de un total de 4300 piezas producidas, lo cual implica una tasa de falla mínima. Este tipo de características se analiza y modela con un proceso Poisson; específicamente, la capacidad del proceso tiene una tasa de defectos de 0.055 con límites de confianza de 0.028 y 0.097, lo cual implica que este es estable. Por otra parte, los defectos por unidad tienen una tasa de 0.055 con los mismos límites de confianza, lo cual también denota estabilidad.

En general, los defectos observados tienden a ser menos que los esperados, lo cual denota una capacidad relativamente alta del proceso. Sin embargo, dado el costo por unidad defectuosa, resulta necesario establecer una estrategia de mejora dado que la proyección de costos por defectos es de 276 000 dólares por año. Además, la confiabilidad del producto tiene un gran impacto en la seguridad de los clientes, por lo que resulta crítico para la empresa determinar condiciones óptimas del proceso para lograr minimizar aún más la cantidad de defectos.

En la etapa 3 (Analizar), todos los datos y mediciones obtenidos de la inspección de rayos X fueron capturados en una hoja de recolección de datos, para luego ser analizados por medio de diseño estadístico con la herramienta Minitab. En esta sección se llevaron a cabo tres experimentos con diferentes valores de proceso sin obtener algún factor significativo.

La etapa 4 (Mejorar) se llevó a cabo con tablillas de diferentes proveedores y se detectó como causante del problema al proveedor chino. Se establecieron parámetros de temperatura robustos y confiables que dieron como resultado el control sobre la generación de bolas de soldadura.

En la etapa 5 (Controlar) se tuvo como resultado cartas de control conforme a los parámetros de temperatura preestablecidos y hojas de lista de comprobación diarias. Por otra parte, el plan de control desarrollado como parte del proyecto es un documento confidencial que no puede ser reportado en este artículo. Los cambios llevados a cabo en el plan de control fueron los siguientes, específicamente en la sección de maquinaria (parámetros): a) el cambio de 400 °C a 440 °C en el área de precalentado; b) se implementó una lista de comprobación diaria por el técnico del equipo, cambio que fue enviado y aceptado por el cliente, y c) la calibración y certificación del equipo (soldadora selectiva) de seis meses a tres meses periódicamente, la cual será llevada a cabo por el departamento de calibración interno. La certificación y calibración por parte del proveedor externo quedó con la misma periodicidad de un año.

Sin embargo, algunas de las actividades críticas planeadas consisten en la inspección de material y un sistema de control más robusto para el problema de rugosidad en los orificios de las tablillas. De igual manera, se actualizó el FMEA del proceso, teniendo en cuenta los principales resultados obtenidos. Los cambios fueron los siguientes: los parámetros de precalentado del equipo soldadora selectiva de 400 °C a 440 °C, la implementación de una lista de comprobación para el control de estos parámetros, el cambio en la periodicidad de certificación de este equipo y la revisión de material en el área de *incoming* por el defecto de rugosidad en orificios pasados, ya que este no era revisado anteriormente.

Finalmente, se encontró la causa raíz del problema en los experimentos 4 y 5.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS 1

Para el primer diseño se conformó un equipo de trabajo con personal invitado de diferentes niveles de la empresa y se definieron objetivos, alcances y limitaciones de este, delegación de tareas y responsabilidades a

cada miembro, así como los tiempos para cada una de las tareas.

También, por medio de una matriz causa y efecto se definieron los posibles factores que podrían tener significancia en el problema (Figura 3).

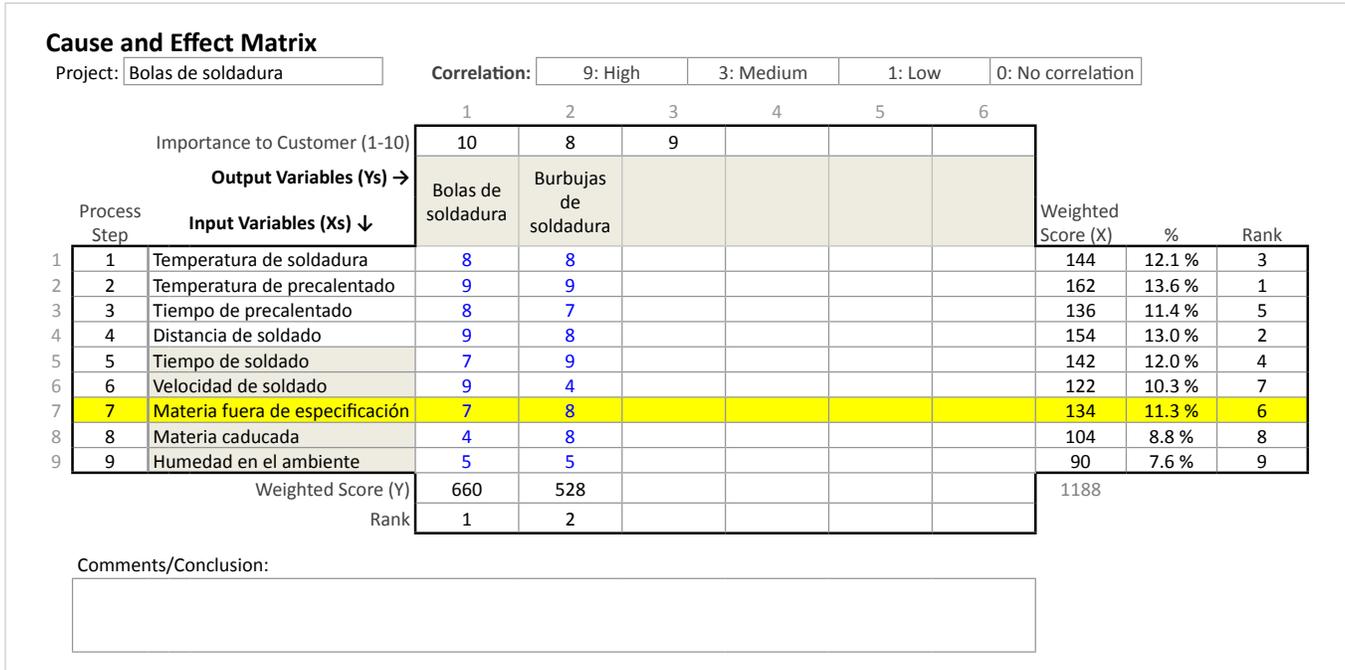


Figura 3. Matriz causa y efecto (elaboración de los autores, en Microsoft Excel).

El equipo de investigación definió el tamaño de la muestra en 100 piezas, las cuales fueron revisadas y analizadas antes de entrar a proceso, así como los conectores y relevadores para el armado de las PCB (un ejemplo se muestra en la Figura 4).

en la que se trabajó y se reunió el equipo de ingeniería para certificar que las temperaturas no tuvieran variación y así dar la aprobación para el experimento con los parámetros de soldadura previamente establecidos, identificando cada una de las piezas que se procesaron.

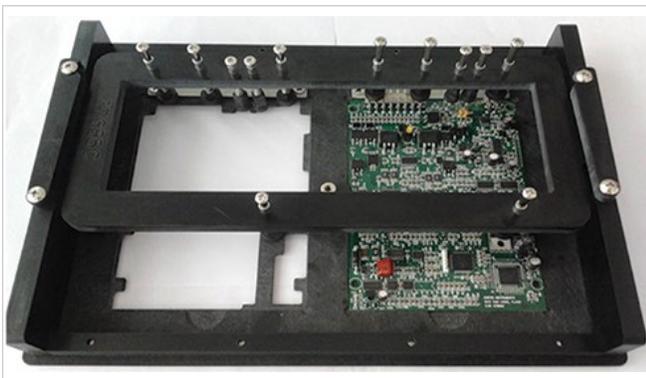


Figura 4. Armado de piezas (fotografía tomada por los autores).

Con el fin de verificar la correcta lectura de temperaturas dentro de la máquina se usó un perfilador para tomar lectura de las diferentes zonas de precalentado y que estas coincidieran con las que se visualizan en la pantalla de la máquina.

Proceso de soldado de las muestras

La primera corrida de 50 piezas se hizo con una temperatura de 340 °C y la segunda con las 50 piezas restantes se hizo a 380 °C, ambas en el área de precalentado.

De acuerdo con la matriz causa y efecto, el primer experimento se llevó a cabo con las temperaturas de precalentado establecidas (340 °C y 380 °C) de la selectiva

Las piezas de estas dos corridas fueron empacadas en bolsas antiestáticas para su manejo y traslado a la máquina de rayos X.

Revisión de las muestras del experimento 1

Cada una de las piezas se colocó y revisó al 100 % en la máquina de rayos X. A las que salieron con defectos se les tomaron medidas y fotografías de cada uno de estos, con los datos que trae cada una de las piezas.

La información obtenida fue vaciada en una hoja de Microsoft Excel para revisarla y analizarla con la regresión de Poisson del software Minitab, dando como resultado los datos de la [Tabla 1](#).

TABLA 1
TABLA DE ANOVA (REGRESIÓN DE POISSON)

FUENTE	GL	DESV. AJUST.	MEDIA AJUST.	CHI CUADRADA	VALOR p
Regresión	2	0.5223	0.2611	0.52	0.770
Temp.	1	0.1293	0.1293	0.13	0.719
Posición	1	0.3930	0.3930	0.39	0.531
Error	213	93.7739	0.4403		
Total	215	94.2962			

Abreviaturas: GL = grados de libertad, Desv. ajust. = desviación ajustada, Temp. = temperatura.

Con un nivel de significancia de 0.05:

- H_0 : La variación en la temperatura de precalentado no tiene efecto significativo en la aparición de las bolas de soldadura en tablillas electrónicas.
- H_1 : La variación en la temperatura de precalentado tiene efecto significativo en la aparición de bolas de soldadura en las tablillas electrónicas.
- Términos significantes: Ninguno de los términos es significativo.
- Decisión: valor p (0.719) es mayor que 0.05.
- No rechazar H_0 .

Se puede observar que ninguno de los términos es significativo, es decir, ningún parámetro del experimento es significativo en la aparición de bolas de soldadura.

La conclusión es que existe evidencia estadística para no rechazar H_0 : la variación en la temperatura de precalentado no influye en la aparición de bolas de soldadura.

Por tanto, se continuó con tres diseños de experimentos más tomando en cuenta cada uno de los factores de la matriz de causa y efecto según su orden de importancia.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS 2

En esta corrida se trabajó con 1, 0.6 y 0.2 mm como parámetros de contacto de soldado. Igual que en el experimento 1, se siguió con los mismos pasos de proceso: el mismo patrón de armado de piezas muestra, verificación de equipo de medición, revisión de muestras y vaciado de resultado.

En la [Tabla 2](#) se observan los datos obtenidos de este diseño de experimentos.

TABLA 2
ANÁLISIS DE VARIANZA

FUENTE	GL	PRUEBA DE WALD	
		CHI CUADRADA	VALOR p
Regresión	2	0.49	0.781
Posición	1	0.00	1.000
Distancia	1	0.49	0.482

Con un nivel de significancia de 0.05:

- H_0 : La distancia de soldado no tiene efecto significativo en la aparición de las bolas de soldadura en las tablillas.
- H_1 : La distancia de soldado tiene efecto significativo en la aparición de bolas de soldadura en las tablillas.
- Términos significantes: Ninguno de los términos es significantes.
- Decisión: con un valor p (0.482) mayor que 0.05.
- No rechazar H_0 .

Se puede observar que ninguno de los términos es significativo, así como tampoco sus interacciones, por lo tanto, se puede corroborar que ningún parámetro del experimento es significativo en la aparición de bolas de soldadura.

La conclusión es que existe evidencia estadística para no rechazar H_0 : la distancia no es un factor significativo en la aparición de bolas de soldadura.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS 3

Debido al resultado de los experimentos 1 y 2 en el que no fue significativo la variación en el parámetro *distancia de contacto*, se tomó la decisión de seguir con los experimentos tomando otros factores del diagrama de causa y efecto y hacer interacciones entre ellos.

Se propuso el experimento con los siguientes factores: temperatura de soldadura de 300 °C y 340 °C, velocidad de soldadura de 1 y 3 mm/s y distancia de contacto de soldadura de 1 mm y 0.3 mm. Se siguió el mismo procedimiento de la corrida anterior.

Después de hacer la revisión, se ordenaron los datos para analizar el experimento en Minitab con un diseño de regresión de Poisson en el que se obtuvo el siguiente resultado (Tabla 3 y Figura 5).

TABLA 3 ANÁLISIS DE VARIANZA DE TEMPERATURA

FUENTE	GL	PRUEBA DE WALD	
		CHI CUADRADA	VALOR p
Regresión	6	0.82	0.991
Temperatura	1	0.00	0.998
Velocidad de soldado	1	0.00	0.997
Distancia de soldado	1	0.00	0.998
Temperatura * velocidad de soldado	1	0.00	0.997
Temperatura * distancia de soldado	1	0.00	0.998
Velocidad de soldado * distancia de soldado	1	0.00	0.998

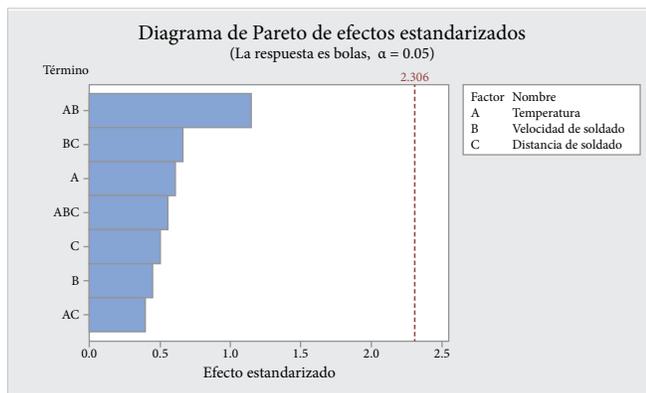


Figura 5. Diagrama de Pareto.

Con un valor de significancia de 0.05, se puede observar que ninguno de los términos es significativo, así como tampoco sus interacciones, por lo tanto, ningún parámetro del experimento es significativo en la aparición de bolas de soldadura, como se observa en el diagrama de Pareto de la Figura 5.

- H_0 : El efecto de la variación en la temperatura de soldadura, la velocidad y distancia de soldado y sus

interacciones no tienen efecto significativo en la aparición de bolas de soldadura en las tablillas.

- H_1 : El efecto de la variación en la temperatura de soldadura, la velocidad y distancia de soldado y sus interacciones tienen efecto significativo en la aparición de bolas de soldadura en las tablillas.
- Por lo tanto, se rechaza H_0 , como se puede observar la variable de entrada temperatura de soldadura, y se acepta H_1 .
- Decisión: con un valor p (0.991) mayor a 0.05 en todas sus variables de entrada y sus interacciones.

La conclusión es que con un nivel de significancia de 0.05 existe evidencia estadística para no rechazar H_0 . El efecto en la variación en la temperatura de soldadura, la velocidad y distancia de soldado, así como las interacciones entre ellas no son significantes en la aparición de bolas de soldadura.

En concordancia con la secuencia de la matriz causa y efecto y debido a que no se ha encontrado qué factor es significativo en la aparición de bolas de soldadura, se tomó la decisión de continuar con el siguiente factor de la tabla para realizar el diseño de experimentos 4.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS 4

Con base en los resultados anteriores del software de Minitab en que no fueron significantes los parámetros que se variaron (distancia de contacto, temperaturas de soldadura y de precalentado), se decidió continuar con los factores priorizados del diagrama de causa y efecto para elaborar otro diseño de experimento con el fin de encontrar la variable que está generando las bolas de soldadura. Por esta razón se tomó la variable *material*, ya que la empresa tiene dos proveedores de la tablilla electrónica (fabricada en los Estados Unidos y en China). Este diseño se llevó a cabo en dos réplicas.

En ambas réplicas se trabajó con 100 tablillas del proveedor chino y con 100 tablillas del proveedor estadounidense. En ambos casos, los parámetros fueron temperaturas de soldadura de 320 °C y de precalentado de 400 °C, así como distancia de contacto de 1 mm y 2 mm/s.

Una vez terminada la revisión, se ordenaron los datos para analizar el experimento en Minitab con un diseño Tasa de Poisson de dos muestras en el que se obtuvo el siguiente resultado (Tablas 4 y 5).

TABLA 4
TASA DE POISSON DE DOS MUESTRAS (RÉPLICA 1)

MUESTRA	N	TOTAL DE OCURRENCIAS	TASA DE LA MUESTRA
Proveedor chino	100	12	0.12
Proveedor de EUA	100	0	0.00

TABLA 5
TASA DE POISSON DE DOS MUESTRAS (RÉPLICA 2)

MUESTRA	N	TOTAL DE OCURRENCIAS	TASA DE LA MUESTRA
Proveedor chino	100	12	0.12
Proveedor de EUA	100	1	0.01

Hipótesis alterna $H_1: \lambda_1 - \lambda_2 \neq$

DIFERENCIA ESTIMADA	IC DE 95 % PARA LA DIFERENCIA
0.11	(0.0393325, 0.180668)

Con base en el resultado del experimento de Poisson de dos tasas, se puede observar que sí existe diferencia entre las dos tablillas y que china es la que tiene más ocurrencias en la generación de bolas de soldadura.

Comprobación de resultados

Para comprobar el experimento anterior se propuso hacer una corrida con más piezas de la tablilla fabricada en los Estados Unidos para asegurar que esta no tiene problemas en la generación de bolas de soldadura. Esto se hizo con los parámetros de proceso con los que se trabaja en la línea de producción diariamente.

De acuerdo con los datos obtenidos no se encontró ninguna pieza con el defecto de bolas de soldadura. En la corrida con tablilla china apareció nuevamente el problema de bolas de soldadura, razón por la cual se mandaron piezas a revisión de corte transversal para establecer cuál es la diferencia entre estas dos tablillas.

Estos fueron los resultados de lo que se observó en la tablilla china. En el análisis del orificio pasado de las piezas donde se tiene el problema de bolas se observó que los orificios tienen rugosidad, característica que provoca que se quede encapsulado el flux en estas ranuras y al contacto con la soldadura se crean pequeñas explosiones que generan estas bolas y que saltan fuera del orificio, creando así el riesgo de que pueda crearse un corto de soldadura entre terminales de componentes

de los circuitos integrados o de SMT (Surface Mount Technology). En la Figura 6 se muestran dos imágenes obtenidas de estas piezas.

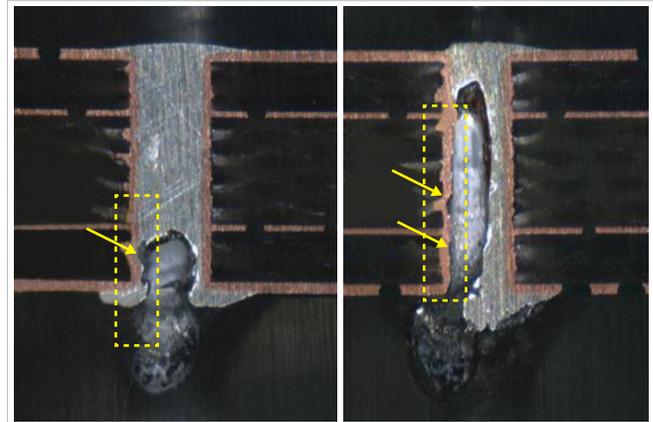


Figura 6. Cortes transversales. Las flechas apuntan a la rugosidad en las paredes de los orificios pasados.

Con los resultados de corte transversal se llegó a la conclusión que las tablillas del proveedor chino tienen problemas de calidad por la variación en la rugosidad de los orificios pasados.

Con base en este hallazgo, se estableció comunicación con el proveedor de las tablillas con defecto, notificándole los resultados que arrojaron los diseños de experimentos y el estudio de corte transversal realizado a las tablillas, para su retroalimentación y en espera de la revisión de sus procesos.

Después de recibir la información del encargado de este proyecto, el proveedor revisó sus procesos para investigar la causa de la rugosidad de los orificios pasados en sus tablillas. El proveedor realizó un reporte que hizo llegar al equipo del proyecto, denotando los siguientes resultados obtenidos de la investigación que llevó a cabo en sus procesos:

- Se cambió el tipo de cortador que estaba utilizando para maquinarse los orificios de las PCB: era uno de carburo de 4 filos o 4 labios y se sustituyó por uno de 2 filos.
- Se elevó la velocidad de corte en el equipo que hace los orificios en las tablillas.

Estimación de parámetros

Con los resultados del corte transversal, se reunió el equipo para diseñar un plan de trabajo con el fin de

buscar los parámetros ideales con los que el área de producción pueda trabajar con los dos proveedores.

EXPERIMENTO 5 PARA ESTIMAR LOS PARÁMETROS IDEALES

Con el mismo procedimiento de los experimentos anteriores, se decidió trabajar con los primeros factores de la matriz de causa y efecto. Se seleccionó el de temperatura de soldadura, variándola a 340 °C.

El resultado del experimento no fue el deseado, pues de 200 piezas que se metieron a proceso 63 de ellas salieron con defecto.

EXPERIMENTO 6 PARA ESTIMAR LOS PARÁMETROS IDEALES

Para este experimento se trabajó con el parámetro temperatura de precalentado a 440 °C con tablillas de los dos proveedores. El equipo de ingeniería preparó y armó las piezas que se procesaron en la línea 1, así como la identificación de estas y la revisión y validación de los equipos fue hecha por el departamento de calibración.

Todas las piezas fueron empaquetadas en bolsas antiestáticas y llevadas a su revisión en la máquina de rayos X. Los resultados obtenidos de la experimentación se muestran en las Tablas 6, 7 y 8.

TABLA 6
ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS IDEALES

MUESTRA	N	TOTAL DE OCURRENCIAS	TASA DE LA MUESTRA
Buena / Mala	100	1	0.001
Buena / Mala	100	0	0.00

Prueba
Hipótesis nula $H_0: \lambda_1 - \lambda_2 = 0$
Hipótesis alterna $H_1: \lambda_1 - \lambda_2 \neq 0$

TABLA 7
PRUEBA DE HIPÓTESIS

MÉTODO	VALOR DE Z	VALOR p
Exacta		1.000
Aproximación normal	100	0.317

TABLA 8
ESTIMACIÓN DE LA DIFERENCIA

DIFERENCIA ESTIMADA	IC DE 95 % PARA LA DIFERENCIA
0.01	(-0.0095996, 0.0295996)

Con estos resultados se hicieron corridas para corroborar los datos obtenidos con el factor de 440 °C en precalentado. La corrida en la primera fase fue con 600 piezas de ambos proveedores sin encontrar bolas de soldadura, en la segunda fase se corrió todo un día de producción con los mismos resultados y en la tercera y definitiva fue un mes completo con el material de los dos proveedores y con los mismos parámetros, teniendo un mes libre de este defecto.

Como seguimiento al experimento seis sin bolas de soldadura, el equipo se reunió para evaluar los resultados obtenidos y dar continuidad a la segunda fase del experimento. Ahí se definió lo siguiente: día de la corrida del experimento (27 de septiembre de 2021), turno (1.º), cantidad de piezas a procesar (600), proveedor (ambos), equipo para armado de tablillas (Ingeniería y Producción), empaquetado de tablillas procesadas, revisión de tablillas en máquina de rayos X (4 de octubre) y análisis de resultados de rayos X.

Los resultados observados en esta segunda fase del experimento 6 fueron mejores de los esperados, como se muestran en las Tablas 6, 7 y 8. De las 600 piezas, revisadas al 100 % en rayos X, solo una tuvo una bola de soldadura de 0.45 mm de diámetro que, de acuerdo con los criterios de calidad del IPC y de la empresa, es considerada pieza buena.

Con estos resultados, el equipo tomó la decisión de mandar a pruebas de funcionalidad y destructivas 50 piezas de esta corrida para su valoración, ya que esta es una corrida especial con la temperatura de precalentado fuera de especificación de proceso y en búsqueda de los parámetros ideales para utilizar las tablillas de los dos proveedores sin tener que estar segregando las del proveedor chino y procesarlas aparte de las del proveedor de los Estados Unidos con diferentes parámetros para cada uno, ya que esto implicaría pérdida de tiempo para que se establezcan las temperaturas de acuerdo a cada proveedor.

La otra decisión que tomó el equipo es hacer una corrida más grande también con los dos proveedores. Se propuso correr todo un turno de producción sin intervención del departamento de ingeniería en el armado de las tablillas y que el proceso se dé en el flujo de un día de trabajo. Las 50 piezas que se enviaron para las pruebas previamente mencionadas fueron identificadas individualmente para que los resultados de funciona-

lidad y destructivas que se obtengan fueran fáciles de identificar.

Como se había acordado en la reunión anterior del equipo, en la tercera fase del experimento 6 se trabajó todo un turno con tablillas de los dos proveedores con los mismos parámetros de la corrida previa, en lo cual participó personal de producción para procesar las tablillas de acuerdo con las condiciones con las que se labora diariamente.

Las piezas elaboradas durante el primer turno fueron 2050 y todas pasaron por el proceso de revisión en la máquina de rayos X al 100 %, la cual cuenta con un software previamente cargado con las imágenes de los diferentes modelos que se trabajan en la línea de producción. Al momento de la revisión de las diferentes áreas de la PCB, el equipo compara lo que debe estar y lo que no debería estar en las imágenes. Cuando se detecta alguna anomalía en las imágenes (escoria, bolas de soldadura o insuficiencias de soldadura), se ejecuta el sistema de medición con el que está habilitado el sistema del software. Si en la medición se obtiene una medida mayor a la permitida, la máquina la detecta como pieza mala o no conformante. En este proceso, la máquina toma la decisión; no interviene el ser humano.

De estas 2050 piezas no se tuvo ningún defecto de bolas de soldadura; fue una corrida sin defectos. Los resultados obtenidos (los de las tres fases del experimento 6 y los de las piezas que se mandaron a pruebas de eficiencia y destructivas) son la base para sacar conclusiones y que la empresa tome las mejores decisiones con respecto al uso de las tablillas del proveedor chino o si se rechazan y se regresan al proveedor.

A continuación, se mencionan algunos otros resultados y aportaciones logrados al cierre del proyecto.

Se encontró la causa raíz del problema de bolas de soldadura, se eliminó el riesgo de falla en campo de las piezas por este defecto, se lograron parámetros de precalentado robustos y confiables, se logró una mejora en el proceso de la materia prima del proveedor, se definió un proceso robusto para trabajar con los dos proveedores de la tablilla con los mismos parámetros.

También, se eliminó el riesgo de falla en campo de las piezas por este defecto, se lograron parámetros de precalentado robustos y confiables, se consiguió una me-

jora en el proceso de la materia prima del proveedor, se redujo el tiempo de ciclo por pieza de 10 a 8 s.

Además, se redujeron tres operadores en el proceso (12 000 USD de ahorro anual), se eliminó el uso de un proceso de inspección de rayos X y se redujo el *scrap* (276 200 USD de ahorro anual).

Como ya se mencionó, el precalentado no era la fuente significativa de la aparición de bolas de soldadura. El factor significativo que arrojó el diseño de Poisson de 2 tasas fue la tablilla del proveedor chino el que tuvo todas las discrepancias en los orificios pasados. Específicamente, se encontró rugosidad en las paredes de los orificios, causada por la variación en la velocidad de perforación de la PCB.

El análisis de capacidad de Poisson, utilizando los datos de la última corrida de validación con PCB de los dos proveedores y con la modificación en los parámetros de precalentado en 440 °C, dio como resultado que la capacidad del proceso resultó con una tasa de defectos de 0.0046, con límites de confianza de 0.0001 y 0.0258. La tasa estimada después de la mejora, así como los respectivos límites de confianza, presentaron una disminución considerable, dado que la tasa de fallas al inicio del proyecto fue estimada en 0.055, con límites de 0.028 y 0.097, lo cual demuestra el impacto de la mejora lograda con la realización del proyecto. Por otra parte, aunque la tasa de fallas inicial resultaba en realidad pequeña, la importancia del proyecto radica en la seguridad y confiabilidad del producto, dado que cualquier defecto o causa de falla latente en las piezas en campo sería muy costosos y afectaría notablemente la reputación de la empresa.

IV. CONCLUSIONES

El factor temperatura resultó ser no significativo en la aparición de las bolas de soldadura en las tablillas electrónicas. Se experimentó también con otros factores, como el de distancia de soldado, variando las dimensiones en 1 mm, 0.6 mm y 0.2 mm, y, de acuerdo con la tabla de varianza de Minitab, el valor de p (0.482) fue mayor que el valor de α de 0.05, comprobándose que la distancia tampoco era significativa. Dado que no se había encontrado el parámetro o la variable que estaba impactando negativamente, se decidió hacer una interacción de valores de temperatura de soldadura (300 °C y 340 °C) y velocidad de soldado (1 y 3 mm/s) en el experimento 3

con resultados nada favorables con respecto a encontrar el factor que provocó este defecto (el valor p fue de 0.998 mayor de 0.05). Por lo tanto, la temperatura, velocidad o la interacción resultaron no significantes o influyentes en la generación de bolas de soldadura.

En el experimento 4 se trabajó con la variable de material de los dos proveedores de las tablillas y, de acuerdo con el resultado de un diseño Tasa de Poisson de dos muestras con el software Minitab, se observó una diferencia entre las dos tablillas, siendo las del proveedor chino con las que se tuvo el total de ocurrencias en la aparición de bolas de soldadura. Por lo tanto, se diseñó un experimento más solo con piezas del proveedor de los Estados Unidos, dando como resultado cero defectos.

También, en el experimento 6 se obtuvieron buenos resultados elevando la temperatura de precalentado por arriba del rango de permitido para hacer pruebas y buscar el poder trabajar con los dos proveedores de tablillas. Por esta razón, se decidió dejar estos parámetros apoyándose en la aceptación del cliente para trabajar con estos, con sus respectivas pruebas de aseguranza de calidad de las tablillas procesadas. En lo que respecta a futuros experimentos, queda pendiente uno con el método de Taguchi, que no fue posible ejecutar por limitaciones de tiempos y material para este diseño.

REFERENCIAS

- [1] OIT, “La fabricación de componentes electrónicos para las industrias de las tecnologías de la información: El cambio de las necesidades con respecto a la mano de obra en una economía mundializada”, ILO.org, 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/meetingdocument/wcms_161175.pdf. (Acceso: nov., 14, 2020).
- [2] G. D. Asensi et al., *Prácticas de Circuitos y Funciones Electrónicas*, 1.ª ed. Cartagena: CRAI UPCT Ediciones, 2019.
- [3] A. Blanco. “Materiales de construcción de las tarjetas electrónicas”. Altium.com. <https://resources.altium.com/es/p/materiales-de-construccion-de-las-tarjetas-electronicas> (acceso: feb. 20, 2021).
- [4] TMS. “Soldadura por ola”. tecnologiademontajesuperficial.es. <https://tecnologiademontajesuperficial.es/t/>

[SOLDADURA-SMT-POR-OLA.htm](#) (acceso: mar. 2, 2021).

- [5] R. J. Herrera y T. J. Fontalvo, *Seis Sigma. Métodos Estadísticos y sus Aplicaciones*, 1.ª ed. Pro Quest, 2016.
- [6] E. A. Sánchez, “Seis Sigma, filosofía de gestión de la calidad: Estudio teórico y su posible aplicación en el Perú”, tesis de licenciatura, Fac. de Ing., Univ. de Piura, Perú, 2005.
- [7] R. A. Gómez y S. Barrera, “Seis sigma: un enfoque teórico y aplicado en el ámbito empresarial basándose en información científica”, rep. de inv., 2011. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/515/1/13.223-242.pdf>
- [8] M. Manzano y V. G. Soler, “Lean manufacturing 5S implantation”, *3C Tecnol.*, vol. 5, no. 4, pp. 16-26, 2017, doi: 10.17993/3ctecno.2016.v5n4e20.16-26.
- [9] R. C. Garza, C. N. González, E. L. Rodríguez y C. M. Hernández, “Aplicación de la metodología DMAIC de Seis Sigma con simulación discreta y técnicas multicriterio”, *Métodos Cuantitativos para la Econ. y la Empresa*, vol. 22, pp. 19-35, 2016, doi: 233148815002.
- [10] R. I. García, P. Parroquín, R. Romero, R. D. Molina, I. Canales y A. Garza, “Reducción de costos en pequeñas y medianas empresas con un enfoque Seis Sigma”, *CULCYT*, vol. 12, no. 57, pp. 352-361, 2016, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/793>.
- [11] H. Ponce, D. Cornejo, J. Molina y F. J. López, “Implementación de la metodología seis sigma para mejoramientos de troqueles de alta velocidad”, *CULCYT*, vol. 12, no. 56 (esp. no. 1), pp. 165-177, 2015, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/811/774>.
- [12] M. A. Polendo, P. C. Parroquín, R. Noriega y R. Romero, “Mejoramiento de tiempos de servicio a usuarios de laboratorios de una institución de educación superior”, *CULCYT*, vol. 13, no. 59 (esp. no. 1), pp. 38-49, 2016, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/1445>.
- [13] M. Rodríguez, J. Molina, L. F. Fernández y N. Alba, “Aplicación de la Metodología Seis Sigma para controlar

los parámetros significativos en la producción de un guante de nylon con recubrimiento de látex”, *CULCYT*, vol. 13, no. 58 (esp. no. 1), pp. 271-283, 2016, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/1436>.

- [14] L. A. Mireles y F. J. Estrada, “Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para la mejora de procesos. Caso de estudio en una línea de ensamble de bombas de gasolina”, *CULCYT*, vol. 14, no. 63 (no. esp.), pp. 71-87, 2017, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/2195>.
- [15] I. Navarro, G. Ibarra y J. G. Palacios, “Análisis con enfoque holístico e implementación de mejora a la línea de producción BTS”, *CULCYT*, vol. 12, no. 56 (esp. no. 1), pp. 152-164, 2015, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/810>.
- [16] H. Arévalo y E. Paolo, “Aplicación de la metodología seis sigma para aumentar la exactitud de registro de inventario en una empresa de elaboración de bebidas”, 2019”, Universidad Nacional de Ingeniería, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/18470>
- [17] J. Chávez, “Propuesta de aplicación de la metodología de Seis Sigma en el proceso de productivo de lavavajillas de una empresa de consumo masivo para reducción de pérdidas e incremento de su eficiencia”, tesis de licenciatura, Univ. Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2022.
- [18] S. M. Castro-Escobar, L. Jaimes-Cerveleón, Z. Peñaranda-Ayala y Z. Nieto-Sánchez, “Seis sigma para la solución de problemas de la calidad. Caso de estudio proceso de envasado de café molido”, *Mundo FESC*, vol. 11, no. s4, pp. 170-189, 2021.
- [19] J. Chávez-Medina, N. A. Santiesteban-López, J. L. Carmona-Silva e I. Muñoz-Montero, “Efecto del mantenimiento industrial, maquinaria y equipo, mano de obra, métodos de trabajo y materia prima con respecto al nivel de Six Sigma en una Pyme: Caso Bloquera Medina del municipio de San Pedro Cholula, Puebla”, *Revista Ingeniería Industrial*, vol. 2, no. 6, pp. 34-44, 2018.
- [20] J. Chávez, N. A. Santiesteban, F. O. González, M. C. Fierro-Xochitotl y V. G. Luna, “Optimización del proceso de barrenado para el incremento de productividad y reducción de rechazos a través de la metodología DMAIC: Caso empresa del sector automotriz”, *Estudios de Administración*, vol. 29, no. 1, pp. 142-164, 2022, doi: [10.5354/0719-0816.2022.66714](https://doi.org/10.5354/0719-0816.2022.66714).
- [21] S. Joshy, V. Verdingovas, M. Jellesen y R. Ambat, “Simulation of electronic circuit sensitivity towards humidity using electrochemical data on water layer”, *2015 IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference (EPTC)*, 2015, pp. 1-5, doi: [10.1109/EPTC.2015.7412281](https://doi.org/10.1109/EPTC.2015.7412281).
- [22] M. N. Guerrero, “Optimización del proceso de soldeo por ola mediante diseño de experimentos”, tesis de maestría, Centro Universitario Querétaro, Querétaro, Qro., nov. 2017.
- [23] M. Arra, D. Shangguan, S. Yi, R. Thalhammer y H. Fockenberger, “Development of lead-free wave soldering process”, en *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 25, no. 4, pp. 289-299, Oct. 2002, doi: [10.1109/TEPM.2002.807731](https://doi.org/10.1109/TEPM.2002.807731).
- [24] J. Tobón, Á. Zapata, A. Orozco, Á. Baena, C. Serna y H. Sánchez, “Fabricación y caracterización de la aleación Au-Si en composiciones próximas al eutéctico”, *Rev. Colombiana de Materiales*, vol. 2, pp. 1-10, 2012, disponible en: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/download/11282/10326/34612>.
- [25] A. A. Bonillo, “Nuevos disolventes eutécticos quirales en organocatálisis asimétrica”, tesis de maestría, Univ. de Alicante, Alicante, Esp., 2020.
- [26] B. Salazar. “Las siete herramientas básicas de la calidad”. *IngenieriaIndustrialOnline.com*. <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/gestion-de-calidad/las-siete-herramientas-de-la-calidad/> (acceso: mar. 10, 2021).
- [27] J. A. Corrales. “Cómo escuchar la voz del cliente e impulsar tu negocio con ello”. *RockContent.com*. <https://rockcontent.com/es/blog/voz-del-cliente/> (acceso: mar. 25, 2021).
- [28] E. Delahoz-Domínguez, R. Zuluaga-Ortiz, A. Periñan-Luna y S. Mendoza-Brand, “Un enfoque de Seis Sigma para evaluar la calidad de la educación superior en Colombia”, *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 33, pp. 386-407, 2022, doi: [10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5313](https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5313)