

# EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ULTRASONIDO COMO MÉTODO ALTERNO PARA LA UNIÓN DE PIEZAS TERMOPLÁSTICAS

M.I. Héctor Adrián Vázquez Flores<sup>1</sup>, Dr. Francisco Javier López Jáquez<sup>2</sup>, Dr. Javier Molina Salazar<sup>3</sup>

**Resumen**—Este artículo se enfoca en validar la técnica de unión con soldadura por ultrasonido de una pieza plástica. Se discute el proceso de ensamble entre dos componentes plásticos los cuales se unen a través de adhesivo y se compara mediante un análisis con la técnica propuesta de unión por soldadura ultrasónica. Se utilizó una metodología de seis bloques que ayudó a dar estructura durante a la evaluación y junto con un diagrama de flujo se realizó la fase de pruebas de una forma controlada, logrando la recolección de datos de las dos técnicas. Se realizaron pruebas estadísticas que ayudaron en la toma de la decisión final para demostrar que la soldadura por ultrasonido era una alternativa viable para implementar en el proceso al reducir los defectos en la unión de las piezas.

**Palabras clave**—ultrasonido, soldadura, termoplástico, evaluación.

## Introducción

La unión entre componentes para crear un ensamble completo o ensamble parcial es una práctica común en la industria de la manufactura. Siendo metales y polímeros los materiales más utilizados para su aplicación en ensambles, ya sean sencillos o complejos según lo requiera el producto a desarrollar. Hasta la fecha, los esfuerzos realizados por diseñadores, y a pesar de la evolución de la tecnología, aún existen piezas cuyas características las hacen difíciles de manufacturar en un solo molde. Los métodos principales para la unión de componentes plásticos se pueden dividir en tres categorías principales: unión mecánica, unión por adhesivos y a través de soldadura (Grewell y Benatar, 2007).

La evaluación se desarrolló en una empresa de la localidad que se dedica a la fabricación de refrigeradores, la cual es una empresa líder en la venta de electrodomésticos a través de diferentes marcas en el mercado, generando ventas por más de 60 millones de electrodomésticos anualmente. En el proceso de ensamble de un refrigerador, existe una operación donde se une un arnés de iluminación led a un compartimento plástico interno que lo denominamos gabinete interno. El arnés cuenta con siete bases plásticas las cuales tienen una cinta adhesiva doble cara que se utiliza para unir las bases plásticas al gabinete interno.

La Figura 1 ilustra el gabinete interno de un refrigerador junto con el arnés para la iluminación con varios compartimentos que deben adherirse al gabinete y una vista del compartimento led.

Un proceso típico de soldadura por ultrasonido comienza cuando una fuente de energía eléctrica cambia 60Hz a una frecuencia de ultrasonido alta de 20 a 40 KHZ. Una vez generada la energía eléctrica de alta frecuencia, se utiliza un convertidor para transformarla en energía mecánica. El convertidor es un transductor piezoeléctrico el cual es alimentado a través de corriente de altas frecuencias de la fuente de energía para generar vibraciones mecánicas a la misma frecuencia. Estas vibraciones son transmitidas a un intensificador, el cual ayuda para incrementar o disminuir la vibración.

Para transmitir la energía al área de unión de las piezas se utiliza un sonotrodo. En este punto se utiliza el calor generado por la fricción para, temporalmente, derretir el plástico, lo que causa la fusión de los materiales. Este proceso ofrece diversas ventajas ya que es rápido, soldado en fracciones de segundo, es un proceso limpio y no requiere de otros aportes para realizar el proceso de soldadura (Dale y Leonard, 2011).

El subensamble de gabinete interno y arnés pasan por diferentes operaciones de ensamble y posteriormente pasan a una línea transportadora donde el subensamble es colocado dentro de un gabinete. En esta estación se colocan otros componentes para después pasar al área de espumado con poliuretano para crear el aislamiento térmico de la unidad. En esta estación de espumado de gabinete se han observado problemas de calidad críticos, siendo uno de ellos el espumado de la base led. Este problema de calidad se puede observar en la Figura 2. En la

<sup>1</sup> Héctor Adrián Vázquez Flores es Ingeniero y estudiante de maestría en ingeniería en manufactura egresado de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. hector.vazquez@electrolux.com

<sup>2</sup> Francisco Javier López Jáquez es Profesora Investigador de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. frlopez@uacj.mx (**autor correspondiente**).

<sup>3</sup> Javier Molina Salazar es Profesora Investigador y Coordinador de la Maestría en Ingeniería en Manufactura de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. jamolina@uacj.mx

Figura 2(a) se muestra la base led limpia después de que la unidad paso por el proceso de espuma de poliuretano. En la Figura 2(b) se observa la base led espumada, la cual inmediatamente es identificada como no conformante. En la Figura 2(c) se muestra la ubicación de la base led dentro del compartimento interno de un refrigerador.

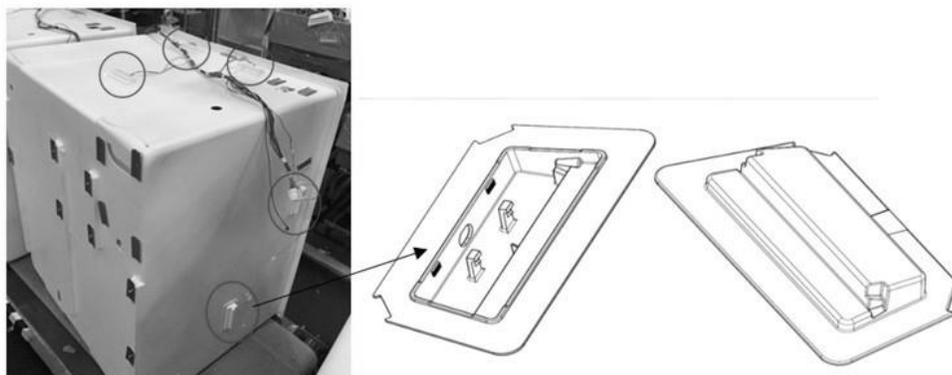


Figura 1. Ensamble de gabinete interno de un refrigerador con arnés led.

La incidencia de este problema fue tal que durante el año 2018 se generaron 491 unidades defectuosas por fuga de espuma en la base led. Por lo tanto, el problema se definió como que existe una unión ineficiente entre la base led y el compartimento, gabinete interno, de un refrigerador, generando fugas de poliuretano en el proceso de espumado.

El objetivo general del proyecto para solucionar el problema fue validar que el método de soldadura por ultrasonido era mejor opción que el proceso de unión con adhesivo doble cara para unir dos piezas plásticas (los fundamentos y varias aplicaciones del ultrasonido pueden encontrarse en Grewell y Benatar, 2007, Mohd y Wan, 2015 y Dale y Leonard, 2011).

La validación de este método alternativo de soldadura por ultrasonido permitiría tomar la decisión de continuar con la implementación del proyecto en mayor escala y generar beneficios importantes tanto a la compañía como en el medio ambiente al eliminar el uso de cinta adhesiva. La discusión se limita al análisis del método actual de unión por adhesivo doble cara y la validación del método propuesto de soldadura por ultrasonido en la unión de piezas plásticas, las cuales se utilizan en la elaboración de un modelo de refrigerador.

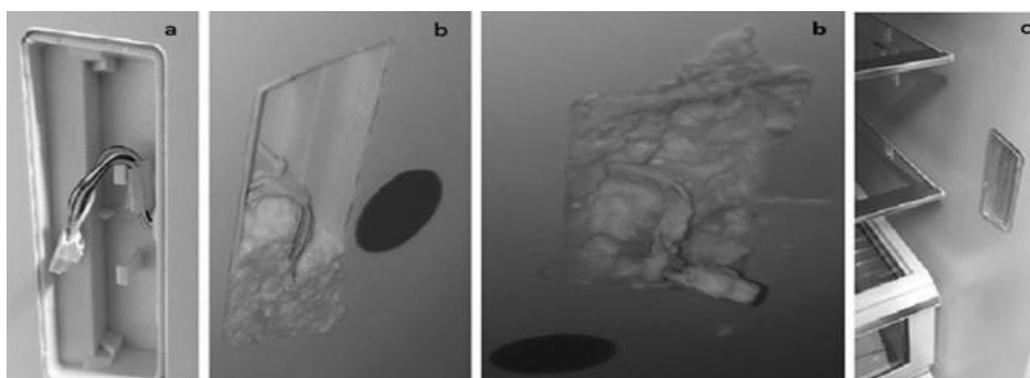


Figura 2. (a) Base led limpia, (b) base led espumada, (c) base led ensamblada.

### Descripción del Método

La metodología propuesta se deriva de la metodología que se utiliza en la compañía para la generación de nuevos productos o de proyectos de alto impacto. La cuál a su vez, tiene bases en la metodología DMAIC, por sus siglas en Inglés (Tang et al 2006). Debido a que se tiene una idea clara de cuál es la principal causa raíz del problema, se optó por seguir la metodología propuesta en la Figura 3, la cual ayuda a confirmar la causa raíz, y a su vez poder realizar una comparación entre el proceso actual y el proceso alternativo en evaluación.

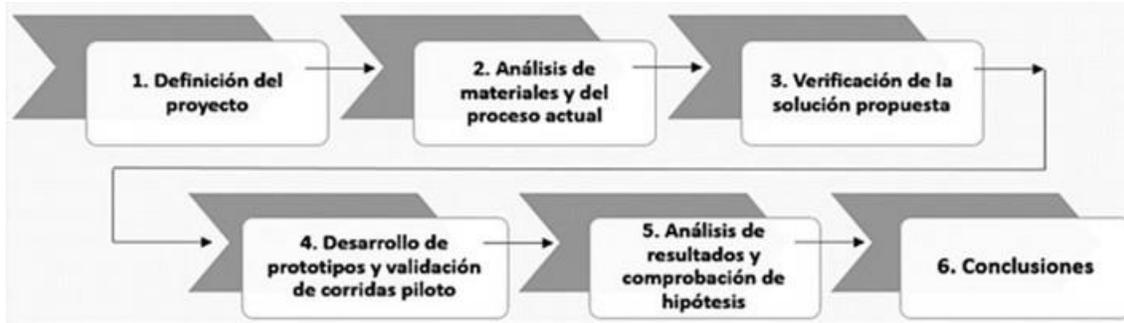


Figura 3. Metodología utilizada para la validación.

En la fase de la definición del proyecto se identificó la razón principal del porque se realizó la investigación, se obtuvo una idea general sobre lo que se quería lograr. Además, se definió el problema, se establecieron los objetivos y se desarrolló la hipótesis.

En la fase de análisis de materiales y del proceso actual se analizaron los componentes que formaban parte del ensamble sometido a la evaluación. Esto para conocer las propiedades de cada material y así poder tomar mejores decisiones durante la fase de pruebas. También se analizaron los diferentes procesos y estaciones por las cuales fluía el ensamble. Esto con la intención de conocer cómo afectaba cada parte del proceso a los componentes involucrados.

La fase de verificación de la solución propuesta tuvo el propósito de conocer la propuesta alterna que se quería evaluar, conocer el equipo, además de establecer los parámetros con los cuales debía funcionar apropiadamente.

La fase del desarrollo de prototipos y validación de corridas piloto fue donde se realizaron las pruebas necesarias para obtener datos para la evaluación. Se seleccionaron pruebas estadísticas las cuales ayudaron a realizar una comparación de los datos de forma objetiva.

En la fase de análisis de resultados y comprobación de hipótesis se realizaron las pruebas estadísticas para poder realizar un análisis de los resultados y decidir si era pertinente el uso de soldadura por ultrasonido en lugar del uso de cinta adhesiva.

Finalmente, en la fase de conclusiones y con base en el análisis de resultados previos se establecieron las conclusiones del proyecto.

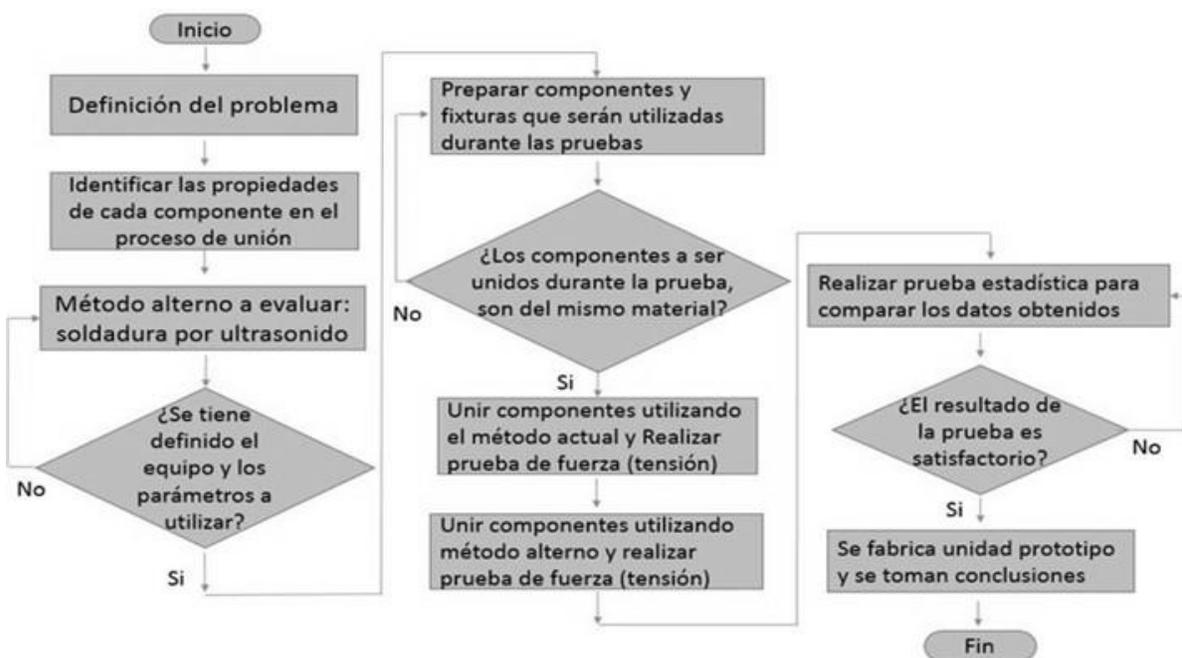


Figura 4. Diagrama de flujo para realizar la evaluación.

### Desarrollo y análisis de pruebas estadísticas

Para realizar la prueba de tensión con el método propuesto de soldadura por ultrasonido, se siguieron los siguientes pasos: Separar 21 bases led de los arneses para mejor manejo. Retirar el adhesivo doble cara de la superficie de la base aplicando calor. Cortar 21 piezas de gabinete interior con el corte para montar la base led. Barrenar parte superior de base led para colocar tornillo. Colocar base led sobre gabinete interior. Preparar equipo de soldadura con los siguientes parámetros. Amplitud de 95%, con un tiempo de 1 segundo, fuerza de aplicación de 20 kg F. Iniciar con prueba, soldando cada sección lateral de la base led. Colocar ensamble en mesa de trabajo y colocar gancho. Realizar prueba de tensión (Prueba de jalón) con equipo medidor de fuerza Mark-10 series 4. Documentar resultados.

Se realizaron pruebas estadísticas en base a los datos obtenidos de las pruebas de tensión utilizando el método en uso y el método propuesto. Se inició analizando la normalidad de los datos y después la capacidad del proceso. Una vez que se tuvo la normalidad de los datos de los métodos se realizó una prueba t de dos muestras para comparar las medias de las poblaciones.

Aunque inicialmente solo se utilizaron 16 datos para la primera prueba estadística de normalidad de los datos se tuvo que incrementar a 21 datos para lograr que ambas muestras se ajustaran a una distribución normal. Esta prueba de normalidad de los datos es importante ya que la prueba t de dos muestras requiere que las muestras sean de una distribución normal como base para este tipo de prueba (Sheldon 2006).

La prueba de normalidad mostró que sí presentaron una distribución normal. Esto se puede observar en la Figura 5 donde se lista que el valor P obtenido fue de 0.066. Por lo tanto, debido a que el valor P es mayor que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula, la cual establece que existe normalidad en los datos de unión con adhesivo doble cara.

En el caso de la unión por ultrasonido Figura 5b) también muestra normalidad en los datos. Se puede observar que el valor P obtenido fue de 0.231 y ya que este valor es mayor que 0.05, se acepta que existe normalidad en los datos de unión con soldadura por ultrasonido. En la Tabla 1 se listan los datos obtenidos de las 21 muestras y el promedio de cada uno de los métodos.

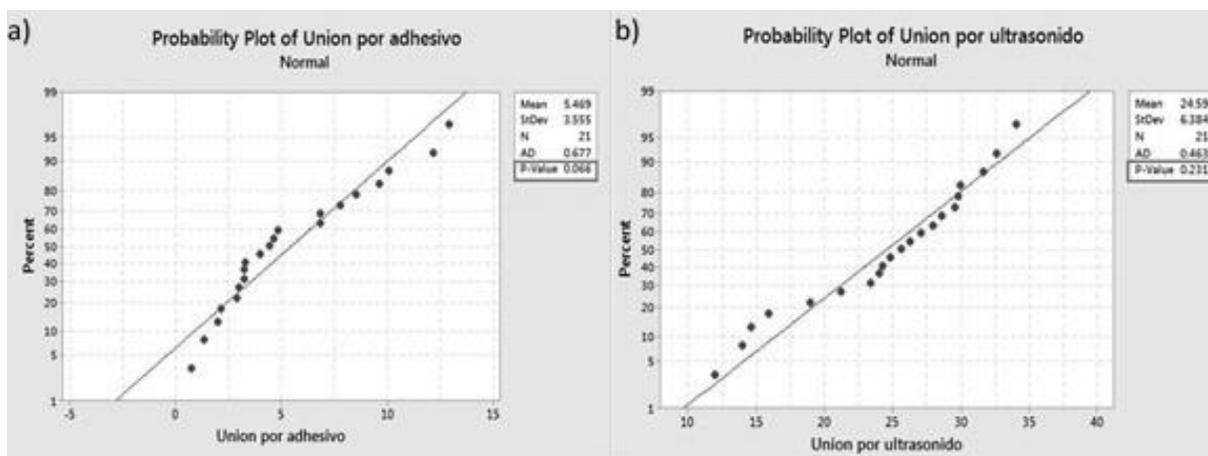


Figura 5. Prueba de normalidad, datos de: a) unión por adhesivo, b) ultrasonido.

| Método de unión            | Muestras |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Promedio |
|----------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Adhesivo<br>(Actual)       | 6.85     | 2.00  | 12.95 | 1.35  | 0.75  | 2.90  | 3.25  | 4.85  | 12.20 | 7.80  | 3.30  | 5.47     |
|                            | 2.15     | 6.85  | 3.25  | 3.00  | 4.00  | 10.10 | 4.65  | 4.45  | 9.65  | 8.55  |       |          |
| Ultrasonido<br>(Propuesto) | 29.55    | 29.95 | 29.80 | 34.10 | 26.30 | 27.05 | 25.60 | 24.80 | 11.95 | 32.65 | 31.65 | 24.59    |
|                            | 28.00    | 28.6  | 13.95 | 21.20 | 23.40 | 24.30 | 15.95 | 24.05 | 14.65 | 18.95 |       |          |

Tabla 1. Datos obtenidos en las pruebas de tensión con método actual y método propuesto.

Ya que se obtuvo normalidad en los datos, se realizaron pruebas de capacidad de proceso en las dos técnicas de unión. Iniciando por el método de adhesivo doble cara, en la Figura 6 se puede observar el valor de Ppk de 0.22 y Cpk de 0.23. La capacidad de proceso de unión por adhesivo es inaceptable debido a que los valores de

Ppk y Cpk se encuentran por debajo del valor aceptable 1.3. Este valor de referencia es aceptado por la industria quien toma como valores aceptables de Ppk y Cpk mayores a 1.3.

La capacidad de proceso con el método propuesto de soldadura por ultrasonido. Al igual que en la gráfica para el método actual, se realizó una comparación de los valores Ppk y CpkK contra el valor de referencia de 1.3. El valor obtenido de Ppk fue de 1.05 y Cpk de 1.38. Comparando con el valor de referencia de 1.3, el valor de Ppk se encuentra ligeramente debajo del valor de referencia pero mejor que en la unión por adhesivo. El valor de Cpk se encuentra por encima del valor de referencia, indicando un proceso adecuado.

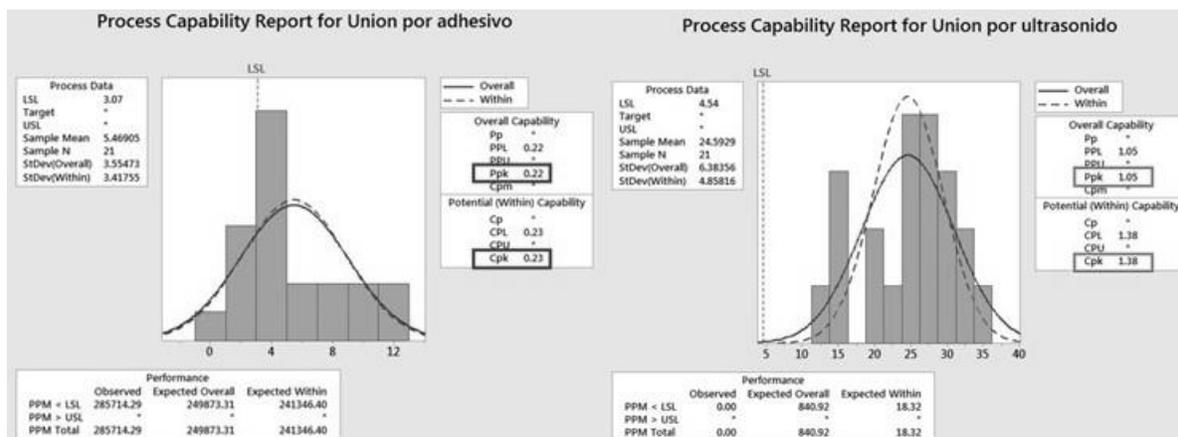


Figura 6. Capacidad de proceso para los métodos de unión.

### Prueba t de dos muestras

Se realizó la prueba t de dos muestras para comparar si las medias entre las dos técnicas de unión eran diferentes.

Para realizar esta prueba, se definió la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alterna ( $H_1$ ), las cuales se formularon como: la fuerza promedio del método actual es igual a la del método usando ultrasonido y la fuerza promedio del método actual es menor que la fuerza usando el método aplicando ultrasonido, respectivamente.

### Two-Sample T-Test and CI: Union por ultrasonido, Union por adhesivo

Two-sample T for Union por ultrasonido vs Union por adhesivo

|                       | N  | Mean  | StDev | SE Mean |
|-----------------------|----|-------|-------|---------|
| Union por ultrasonido | 21 | 24.59 | 6.38  | 1.4     |
| Union por adhesivo    | 21 | 5.47  | 3.55  | 0.78    |

Difference =  $\mu$  (Union por ultrasonido) -  $\mu$  (Union por adhesivo)

Estimate for difference: 19.12

95% CI for difference: (15.87, 22.38)

T-Test of difference = 0 (vs  $\neq$ ): T-Value = 11.99 **P-Value = 0.000** DF = 31

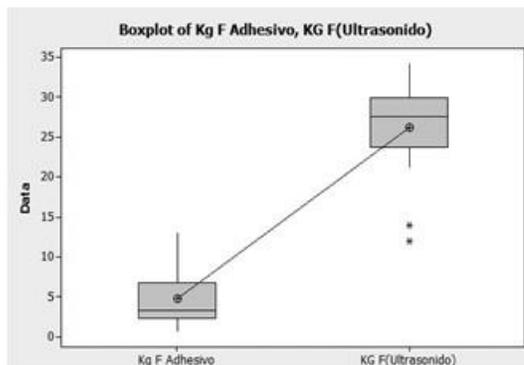


Figura 7. Resultados de la prueba t y gráfica de caja.

Aunque resultaba evidente la diferencia entre los métodos, el reporte que se muestra en la Figura 7 obtenido utilizando el software Minitab, lista los resultados de la prueba t junto con una gráfica de caja. En el reporte se puede observar un valor P de 0.000 y debido a que el valor P es menor que 0.05 se concluyó que existía evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, se confirmó que la unión de soldadura por ultrasonido tiene mayor fortaleza que la unión por adhesivo con cinta doble cara usada como método actual para fijar las bases led al revestimiento interno del refrigerador en cuestión. La gráfica de caja compara las medias de las dos técnicas y se puede observar gráficamente que el método alterno por ultrasonido requiere mayor fuerza para separar los dos componentes.

### Comentarios Finales

El método alternativo de soldadura por ultrasonido es mejor que el método actual de unión por adhesivo. El valor de tensión máxima promedio requerida para separar la base led y el gabinete interno con unión por adhesivo fue de 5.47 Kg F.

El valor de tensión máxima promedio requerida para separar la base led y el gabinete interno con unión por soldadura por ultrasonido fue de 24.59 Kg F.

El problema fue la fuga de espuma de poliuretano entre la base led y el gabinete interno y se definió como: Debido a que la unión entre la base led y el gabinete interno se realizaba manualmente, no existía un equipo o herramienta que permitiera aplicar la fuerza correcta ni el tiempo necesario para que el adhesivo pudiese realizar una unión suficientemente fuerte entre los dos componentes.

Utilizando la técnica de soldadura por ultrasonido permitió reducir el impacto ambiental eliminando al 100% el uso de adhesivos doble cara, protector de adhesivo y cinta adhesiva de papel. Además, se generó un ahorro considerable, para poder invertir en la nueva tecnología de ultrasonido.

Al utilizar la técnica de soldadura por ultrasonido se disminuyó al menos un 80% los problemas de calidad por fuga de espuma entre la base led y el gabinete interno, ya que la base queda herméticamente sellada, con un valor de adherencia de 26 Kg F.

Finalmente, se comprobó la hipótesis general planteada, donde se estableció que: La técnica de soldadura por ultrasonido permite la unión con una fortaleza mayor entre dos piezas plásticas que la unión con cinta adhesiva, logrando reducir las fugas de poliuretano durante el proceso de espumado en un gabinete.

Como recomendaciones se sugiere que, en la siguiente etapa del proyecto, cuando se tenga el desarrollo del equipo por ultrasonido final, y con el diseño de un sonotrodo completo, se realice un diseño de experimentos con el equipo final para obtener los mejores parámetros, los cuales permitan la unión óptima entre las piezas termoplásticas.

### Referencias

Grewell, A. y Benatar, A. "Welding of plastics: Fundamental and new developments," Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University, (2007) 49-52.

Mohd A. M. y Wan A. N. "A review on ultrasonics welding capability: Break away from traditional plastics," Applied Mechanics and Material Vols 789-790 (2015).

Dale, E. y Leonard, J. B. "Ultrasonics : Fundamentals, Technologies, and Applications," CRC Press-Taylor & Francis Group, Third Edition (2011) .

L. C. Tang, T. N. Goh, H. S. Yam y T. Yoap. "Six Sigma: Advanced Tools for Black Belts and Master Black Belts" John Wiley & Sons, Ltd. (2006) 3-18.

Sheldon, R. M. "Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists- Chapter 8 Hypothesis testing," 3rd ed. Amsterdam: Academic Press. (2004) 312-320.

### Notas Biográficas

El **M.I. Héctor Adrián Vázquez Flores** terminó sus estudios de posgrado en ingeniería en manufactura en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

El **Dr. Francisco Javier López Jáquez** es profesor investigador en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en la facultad de Ingeniería Industrial y manufactura. Realizó sus estudios de doctorado en la Universidad de Liverpool, U.K. Ha presentado artículos en congresos nacionales e internacionales y en revistas revisadas por pares.

El **Dr. Javier Molina Salazar** es coordinador de la maestría en ingeniería en manufactura en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en la facultad de Ingeniería Industrial y manufactura. Ha presentado artículos en congresos nacionales e internacionales y en revistas revisadas por pares.