

PROJECT, DESIGN AND MANAGEMENT

ISSN: 2683-1597



Cómo citar este artículo:

Ruiz Santiago, K. & Uc Rios, C. E. (2020). Metodología para desarrollar procesos óptimos de soldadura de materiales termoplásticos (EVA Y EVA/EVOH) usando el sistema de soldaduras de alta frecuencia (HF). *Project, Design and Management*, 2(1), 27-50. doi: 10.35992/pdm.v2i1.293

METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR PROCESOS ÓPTIMOS DE SOLDADURA DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS (EVA Y EVA/EVOH) USANDO EL SISTEMA DE SOLDADURAS DE ALTA FRECUENCIA (HF)

Kelvin Ruiz Santiago

Universidad Internacional Iberoamericana (México)

kelvinsigngraphic@yahoo.com · <https://orcid.org/0000-0002-6821-5097>

Carlos Eduardo Uc Rios

Universidad Internacional Iberoamericana (México)

carlos.uc@unini.edu.mx · <https://orcid.org/0000-0003-1321-019X>

Resumen. El uso de materiales plásticos se ha incrementado enormemente en estos últimos años. Actualmente hay una gran cantidad de compañías industriales y domésticas que manufacturan sus productos usando el proceso de soldadura de termoplásticos con la tecnología de soldadura por alta frecuencia (HF). Pero al inicializar sus procesos para manufacturar productos, realizan los ajustes con el método de "prueba y error" hasta obtener los parámetros óptimos con los que se operarán los equipos de manufactura. Esto conlleva una serie de gastos que impactan el costo, calidad del producto y daño al medio ambiente por el desperdicio de productos descartados. La producción mediante procesos de soldadura de termoplásticos usando el sistema por alta frecuencia (HF), es parte integral de la mayoría de los principales procesos de manufactura. El propósito de la metodología es proponer el desarrollo de procesos óptimos de soldadura de materiales termoplásticos (EVA y EVA / EVOH) utilizando el sistema de soldadura de alta frecuencia (HF), aportando un beneficio de reducir o eliminar la pérdida de tiempo, recursos, desperdicios de materiales, gastos innecesarios, obstáculos y errores, llegando a la meta del proceso. Los resultados para la respuesta muestran que el experimento #27 el proceso tiene un Cpk de 2.98 y el experimento #25 tiene un Cpk de 3.36, dando paso a la metodología, donde estadísticamente permite obtener un proceso de 6 Sigma. En adición, la metodología permite obtener los parámetros operacionales del proceso de soldadura termoplástica en control, confiable y predecible. Permite tener un proceso que pueda producir productos de calidad para seguir siendo competitivos en un mercado global en crecimiento.

Palabras clave: Alta frecuencia (HF), dipolo, polarización, dieléctrico, soldadura termoplásticos.

METHODOLOGY TO DEVELOP OPTIMAL WELDING PROCESSES OF THERMOPLASTIC MATERIALS (EVA AND EVA / EVOH) USING THE HIGH FREQUENCY WELDING SYSTEM (HF)

Abstract. The use of plastic materials has increased enormously in recent years. Currently there are lot of industrial and domestic companies that manufacture their products using the process of welding of thermoplastics with the high frequency welding (HF) technology. But when initializing their processes to manufacture products, they make the adjustments with the "trial and error" method until obtaining the optimal parameters with which the manufacturing equipment will be operated. This entail a series of expenses that impact the costs, quality of the product and damage to the environment due to the waste of discarded products. The production by means of processes of welding of thermoplastics using the system of high frequency (HF), is an integral part of the majority of the main processes of manufacture. The purpose of the methodology is to propose the development of optimal welding processes of thermoplastic materials (EVA and EVA / EVOH) using the high frequency welding system (HF), providing a benefit of reducing or eliminating the loss of time, resources, waste of materials, unnecessary expenses, obstacles and errors, reaching the goal of the process. The results of the answer show that the experiment # 27 the process has a Cpk of 2.98 and the experiment # 25 has a Cpk of 3.36, giving way to the methodology, where statistically allows to obtain a 6 Sigma process. In addition, the methodology allows to obtain the operational parameters of the thermoplastic welding process in control, reliable and predictable. It allows to have a process that can produce quality products to remain competitive in a growing global market.

Keywords: High frequency (HF), dipole, polarization, dielectric, thermoplastic welding.

Introducción

La soldadura de plástico es un proceso destinado a unir piezas constituidas de materiales termoplásticos. La soldadura tiene lugar por el ablandamiento de las zonas a unir. Las moléculas del polímero adquieren cierta movilidad por acción de un agente externo (calor, vibración, fricción, disolvente). Al juntarse ambas piezas y aplicarles presión, se logra la interacción de las moléculas de ambas partes a unir, entrelazándose. Una vez terminada la acción del agente externo, disminuye el movimiento de las moléculas quedando constituida una estructura entrelazada de las mismas, formándose la unión de ambas partes plásticas.

En el mercado existen diversos procesos de soldadura para unir plásticos y la aplicación idónea de cada una de ellas depende de múltiples factores.

Entre las tecnologías más comunes en el mercado industrial para las soldaduras de materiales termoplásticos son:

- Soldadura por placa caliente.
- Sellado por calor.
- Soldadura por láser.
- Soldadura por ultrasonido.
- Soldadura por alta frecuencia (HF).

La soldadura termoplástica utilizando la tecnología de alta frecuencia es el proceso de fundir y unir entre sí los materiales termoplásticos mediante el uso de energía

electromagnética. Dos electrodos crean un campo eléctrico oscilante que comienza a cambiar al mover las moléculas polares dentro de los materiales, con el fin de orientarse de acuerdo con el campo eléctrico. El movimiento de estas moléculas libera energía en forma de calor y cuando se aplica suficiente energía, el material termoplástico comienza a fundirse y unirse entre sí.

Actualmente, hay una gran cantidad de compañías industriales con aplicaciones de: Dispositivos médicos (bolsas de contención para medicamentos intravenosas, bolsas de sangre, bolsas de solución salina, bolsas de oxígeno y bolsas para guardar y mantener las herramientas médicas estériles), Automotriz (carpetas plásticas, almohadillas de talón o tapetes y costuras para tapas convertibles y cubiertas de lona), Papelería (álbumes, los forros para libros, las tapas de agendas, las portas DNI, las carpetas, las portas tarjetas), Artículos de amplio consumo (paraguas, los impermeables, las bolsas plásticas, las cubiertas plásticas, los cinturones, guantes, las vísceras, las mochilas y selladuras de las telas mixtas) y Recreativas (juguetes inflables, los balones, los cojines de aire, los estanques inflables, las camas de agua, empaque del producto) que manufacturan sus productos usando el proceso de soldadura de termoplásticos con la tecnología de soldadura por alta frecuencia (HF).

Comúnmente, al inicializar sus procesos para manufacturar productos, realizan los ajustes con el método de "prueba y error" hasta obtener los parámetros óptimos con los que se operarán los equipos de manufactura (pues tienen dependencia de factores como: tipo de material, temperaturas "pre-calentamiento", presión, corriente, tiempo de soldadura y la etapa de enfriamiento de la soldadura), y de esta manera poder obtener una soldadura de calidad. Lo anterior impacta en el costo, calidad del producto y daño al medio ambiente por el desperdicio de productos descartados.

El artículo se estructura en cuatro tópicos y referencias, además del resumen e introducción y estructura del documento, la metodología con procesos óptimos de soldadura desarrollada, permitirá al sector industrial mejorar la calidad del producto final y reducir los costos asociados al desperdicio de productos.

En el primer tópico se lleva a cabo la definición de la soldadura HF (alta frecuencia) y del principio de la soldadura de plástico, en virtud de mostrar una visión global de esta tecnología.

El segundo tópico está dedicado a los materiales termoplásticos, llevando a cabo un resumen de los principios, comportamientos y las propiedades de los materiales termoplásticos, con la finalidad de saber interpretar el comportamiento de estos tipos de materiales. Se explica la teoría de soldadura por radio frecuencia (HF) con sus características y se explica e identifica el funcionamiento del generador de la soldadura HF.

El tercer tópico está dedicado a la optimización donde se explica el uso de la metodología; se describe un enfoque para identificar, analizar, evaluar y diseñar el experimento (DOE) que permita definir las variables significativas (temperaturas "pre-calentamiento", presión, corriente, tiempo de soldadura y tiempo de enfriamiento de la soldadura), los cuales son los parámetros que afectan las condiciones en el proceso de soldadura de materiales termoplástico usando el sistema de soldadura (HF), con la finalidad de optimizar los resultados y poder así obtener datos estadísticos de manera independiente.

Posteriormente, se realizarán diferentes métodos de diseño experimental para caracterizar algunos tipos de polímeros termoplásticos que se soldarán con la tecnología de alta frecuencia y los resultados se evaluarán por su calidad en la soldadura.

El cuarto tópico, está dedicado a los resultados. Se discuten los resultados obtenidos, destacándose las limitaciones actuales de la metodología. Para evaluar el mejoramiento del proceso de soldaduras térmicas con materiales termoplásticos se usarán los métodos de inspección visual con sistema de magnificación y el método de resistencia de soldadura y finalmente se presenta la conclusión y aportaciones de este artículo.

Método

¿Qué es soldadura HF?

El proceso de soldadura de alta frecuencia (HF), también conocido como radiofrecuencia (RF) y soldadura dieléctrica, consiste en la fusión de material mediante el suministro de energía HF en forma de un campo electromagnético (27,12 MHz) que normalmente se aplica entre dos electrodos metálicos, placas o moldes. La soldadura HF se acompaña con cierta presión o fuerza sobre las superficies del material a unir.

La soldadura por radiofrecuencia o (soldadura de alta frecuencia) es el proceso de unión de materiales mediante el uso de energía electromagnética. Dos electrodos crean un campo eléctrico oscilante que comienza a desplazarse y mover moléculas polares dentro de los materiales para orientarse de acuerdo con el campo electromagnético. El movimiento de estas moléculas libera energía en forma de calor. Cuando se aplica suficiente energía, las moléculas comienzan a derretirse y unirse entre sí. Tomado de (United Foam Plastics [UFP] Technologies, 2020)

Materiales Termoplásticos

Son materiales que pueden ser deformados bajo la influencia del calor y de la compresión, conservando su nueva forma al enfriarse, pero que pueden ser nuevamente reblandecidos por el calor y vueltos a moldear manteniendo las propiedades físicas y químicas al volver a su estado de rigidez inicial después del enfriamiento. Tomado de (Wikiversidad, 2019)

Pero todos los materiales termoplásticos no pueden ser soldados por alta frecuencia, ya que deben poseer otras características muy específicas, especialmente con respecto a su estructura molecular (dipolo), su constante dieléctrica y su factor de pérdida.

Dipolo eléctrico

Un dipolo eléctrico está formado por dos cargas, una positiva y otra negativa del mismo valor, separadas por cierta distancia. Pero un sistema neutro en el que el centro de las cargas positivas no coincide con el de las cargas negativas también se conoce como un dipolo. Un ejemplo típico es la molécula de agua. Al ser el oxígeno más electronegativo que el hidrógeno, se produce una acumulación de carga negativa en el lado en que se halla el oxígeno, y de carga positiva en el opuesto. Tomado de (Wiki, 2017)

La estructura única de la molécula de agua polar, H₂O, es la base para la respuesta térmica del agua cuando se somete a un campo alterno de energía RF. Tomado de (Radio Frequency, 2019)

El agua es polar debido a la diferencia en la electronegatividad entre el hidrógeno y los átomos de oxígeno. El átomo de oxígeno altamente electronegativo atrae electrones de carga negativa, haciendo que la región alrededor del oxígeno sea más negativa que las áreas

alrededor de los dos átomos de hidrógeno. Por lo tanto, el lado del hidrógeno de la molécula es relativamente positivo al lado negativo del oxígeno.

Podržaj y Čebular (2016, pág. 1064) afirman lo siguiente:

Las moléculas del material utilizado deben tener un momento dipolar eléctrico, que se define como $p = \vec{l}Q$, donde p es el momento dipolar eléctrico y \vec{l} es el vector de desplazamiento que apunta desde la carga eléctrica negativa $-Q$ a la carga eléctrica positiva $+Q$. Cuando una molécula de este tipo está en un campo eléctrico (E), el torque (T) interactúa entre sí. El resultado de torque viene dado por la Ecuación 1:

$$T = p \cdot E \quad (1)$$

Estructura Química

Las moléculas de polímeros que forman un termoplástico están unidas entre sí por enlaces intermoleculares, formando estructuras lineales tal como los termoplásticos semi-cristalinos y/o ramificados como los termoplásticos amorfos. Podríamos asemejar su estructura a un conjunto de cuerdas en el que cada cuerda es un polímero. Las cuerdas pueden estar entrelazadas, siendo mayor la fuerza ejercida para separar cada molécula polimérica. Las fuerzas de Van der Waals entre las moléculas poliméricas que forman un material termoplástico pueden ser de diferente grado en función de la composición química de la propia molécula y de la disposición espacial que adopte. En función de esto, la estructura adoptada puede ser amorfa o cristalina y ambas pueden existir en el mismo material. La estructura amorfa se caracteriza por una dispersión desordenada de las cadenas poliméricas y es responsable de las propiedades elásticas de los plásticos. A mayor cantidad de estructuras amorfa mayor es la elasticidad del termoplástico, pero tendrá menor resistencia. En la estructura cristalina las moléculas de polímeros se disponen de forma ordenada y mucho más compacta que en la estructura amorfa. Las fuerzas intermoleculares son más fuertes y por ello las estructuras cristalinas confieren propiedades de resistencia mecánica a los materiales termoplásticos haciéndolos resistente a cargas, tracción y temperatura. Pero a mayor cantidad de estructuras cristalinas disminuye la elasticidad apareciendo la fragilidad. Hay docenas de tipos de termoplásticos y en cada uno de ellos varía la organización cristalina/amorfa y la densidad. Los termoplásticos más utilizados hoy en día son el poliuretano, polipropileno, policarbonato y los acrílicos.

Comportamiento de los termoplásticos amorfos y semi-cristalinos

A temperatura ambiente, el plástico es un material duro. Las macromoléculas se sujetan unas a otras mediante fuerzas intermoleculares, y apenas pueden moverse. Si se aumenta la temperatura, la movilidad de estas macromoléculas crece, así como su elasticidad y tenacidad, pero la resistencia del material disminuye. Por otro lado, la orientación molecular trae consigo propiedades mecánicas que afectan el proceso. Las características mecánicas de estos materiales se pueden ilustrar con una gráfica de rigidez contra temperatura, como se muestra en la Figura 1. La coordenada vertical indica la rigidez, y la coordenada horizontal indica la temperatura del material.

El perfil de la gráfica de los materiales amorfos mostrará que a temperaturas bajas el material se mantendrá en un estado sólido. Con el aumento de temperatura, el material alcanza un estado denominado el estado vítreo, el cual queda caracterizado por la llamada Temperatura de transición vítrea, (T_g). Después de esta temperatura vítrea T_g , el material entrará en una zona de transición que se conoce como la zona vítrea, donde gradualmente perderá su rigidez. Al superar la temperatura de transición vítrea (T_g), las fuerzas

intermoleculares se vuelven tan pequeñas que cuando actúa una fuerza exterior las macromoléculas pueden deslizarse unas sobre otras. La resistencia cae considerablemente, mientras que el alargamiento aumenta bruscamente. En este intervalo de temperaturas el plástico se encuentra en un estado termo-elástico, parecido al del caucho. En la Figura 1 se puede identificar la zona vítrea. Si se sigue aumentando la temperatura se obtendrá un material totalmente blando, parecido a un fundido elástico o gomoso que no es un líquido, adicional las fuerzas intermoleculares son muy pequeñas y tienden a desaparecer. El plástico pasa de manera continua desde el estado termo-elástico al estado fundido. Esta transición se caracteriza por el intervalo de temperaturas de fusión. No se trata, en este caso, de una temperatura concreta. La Figura 1 muestra la zona vítrea T_g , zona estado vítreo y la zona que corresponde a la zona blanda.

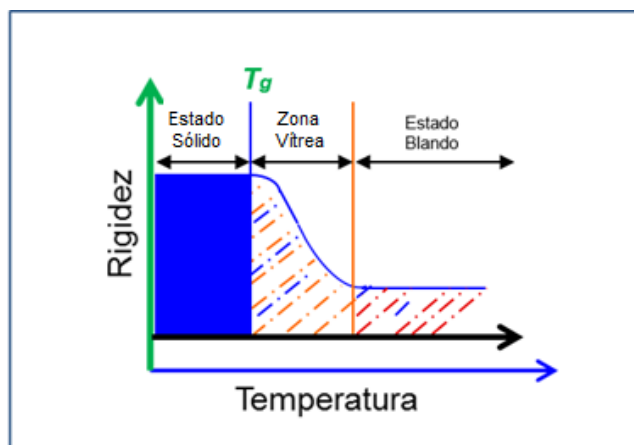


Figura 1. Perfil de los materiales amorfos en zona estado blando.

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

En caso de que continúe el calentamiento del plástico, se produce, en algún momento, la descomposición de su estructura química. Este límite queda definido por la temperatura de descomposición (T_z).

Si las macromoléculas presentan poca ramificación, es decir, pocas y cortas cadenas laterales, entonces es posible que determinadas regiones de las cadenas moleculares se ordenen y dispongan en forma compacta unas al lado de otras. Estas regiones con elevado grado de ordenación dentro de la molécula se denominan regiones cristalinas. Hay que tener en cuenta, no obstante, que nunca se produce una cristalización perfecta o completa, ya que la longitud de las cadenas lo impide, incluso durante la polimerización, cuando se inicia el entrecruzamiento de unas con otras. Por lo tanto, aparte de las regiones ordenadas, siempre queda desordenada una parte de la molécula, con regiones distante unas de otras, llamadas regiones amorfas. Los termoplásticos que presentan tanto regiones cristalinas como amorfas reciben el nombre de termoplásticos semi-cristalinos. Tomado de (Wikiversidad, 2019)

Los termoplásticos semi-cristalinos, no son nunca transparentes, ni tan siquiera cuando están en forma natural, no coloreada, sino que, por causa de la dispersión de la luz en la frontera entre regiones amorfas y cristalinas del plástico, siempre son algo lechosos o de aspecto turbio. En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la Rigidez como función de la Temperatura para los materiales semi-cristalinos, para este perfil, puede observarse que, a cierta temperatura baja, el material se presenta en un estado sólido. Este estado sólido queda representado en la Figura 2 mediante la zona marcada con azul y en el que la rigidez no tiene variaciones importantes con la temperatura. Al igual que los amorfos, a

temperaturas bajas el material se mantiene rígido y con el incremento de la temperatura llegará a la zona vítrea, justo a partir de la temperatura denominada T_g , la cual está indicada en la Figura 2. Cuando se habla de materiales parcialmente cristalinos (semi-cristalinos) no es común utilizar el término T_g . Si se continúa aumentando la temperatura, más allá de la zona vítrea el material perderá algo de rigidez. En los semi-cristalinos la zona vítrea es insignificante y corresponde a la parte amorfa de los materiales. Aun así, continuará en estado sólido. En la Figura 2 se muestra esta zona vítrea.

Si se continúa aumentando la temperatura se alcanzará la temperatura de fundido o derretido T_m .

Después de T_m se obtiene un material líquido. Por esto se dice que los materiales semi-cristalinos se derriten y no se ablandan como los amorfos.

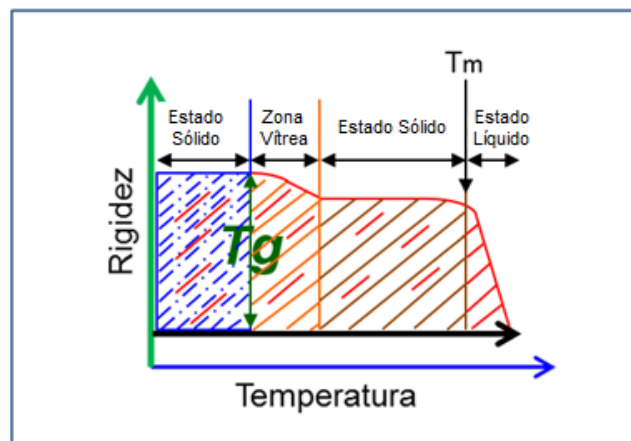


Figura 2. Perfil de los materiales semi-cristalinos en estado líquido

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

Observe que los materiales semi-cristalinos no gozan de una zona de proceso amplia como los amorfos, esto lo hace más difícil de fundir. Por otro lado, en el proceso inverso en donde el material se encuentra en estado fundido y es llevado al estado sólido (disminuyendo la temperatura), la zona de proceso ocurre de forma más rápida que en el caso de los materiales amorfos. La Figura 2, muestra este comportamiento.

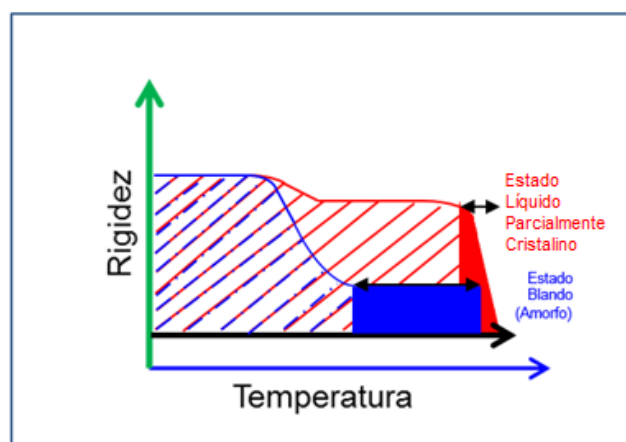


Figura 3. Perfil gráfico de semi-cristalinos vs amorfo.

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 3, se observa que en la gráfica de rigidez vs temperatura se muestra una diferencia entre los polímeros amorfos y los semi-cristalinos. El polímero amorfo muestra, de forma clara las tres regiones del comportamiento visco-elástico: vítrea (visco-elástica), gomosa y blando. Aunque existen diferencias en cuanto a la escala de tiempo para los diferentes polímeros, la forma general de la curva es la misma para todos.

Sin embargo, en los polímeros semi-cristalinos, el fenómeno de la transición vítrea queda tapado en los materiales termoplásticos semi-cristalinos, pues los materiales semi-cristalinos se deshacen a temperaturas superiores a la de transición vítrea de las zonas amorfas.

Las zonas semi-cristalina, constituidas por tramos que se prolongan en las zonas amorfas, actúan como centros de anclaje, que dificultan el ablandamiento del material y el material se comporta como si estuviera reticulado.

Calentamiento eléctrico.

La soldadura (HF) se basa en este principio, que depende en gran medida de las características de los materiales utilizados.

La pérdida dieléctrica de calentamiento es un fenómeno de los materiales que se someten a un campo eléctrico de alta frecuencia (HF) alterno. Cuando la corriente pasa a través de la materia, pierde parte de su energía, que se propaga en el material.

- Si no hay material, la corriente eléctrica pasa por el campo sin pérdidas: su intensidad es la misma al principio (A) y al final (B). (Figura 4)
- Si un material dieléctrico se encuentra en el campo (C), parte de la corriente eléctrica se disipará en el material: su intensidad será más fuerte antes de cruzar el material (A) e inferior después (B). (Figura 5)

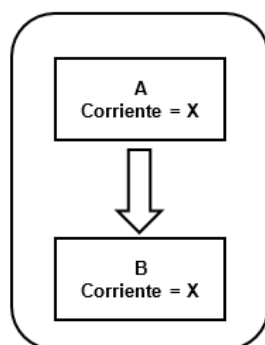


Figura 4. Sin material dieléctrico.

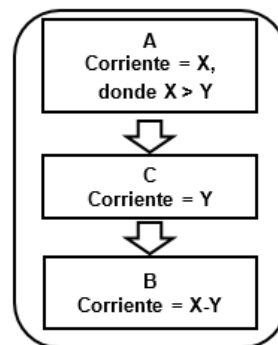


Figura 5. Con material dieléctrico.

Nota: Fuente: Elaboración Propia

Naldini, Bianco, Amado, Nolasco y Pérez (2016, págs. 2700-2701) afirman lo siguiente:

Además, a este efecto se le suma el calentamiento producido por las pérdidas dieléctricas por conductividad, que se desarrolla en su seno al paso de la corriente de RF. A bajas frecuencias la potencia disipada en el dieléctrico es baja debido a la rápida alineación de los dipolos con el campo eléctrico, y las pérdidas dieléctricas son despreciables. Al incrementarse la frecuencia, la alineación de los dipolos se desfasa con respecto al campo eléctrico, con un

marcado incremento de las pérdidas dieléctricas, produciéndose una transformación de la energía del campo en calor.

Durante el proceso de pérdidas dieléctricas parte de la energía es absorbida por el material y no es devuelta. ¿Qué sucede entonces con esa pequeña parte de la energía? Como dice La ley de la conservación de la energía: "La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma". Y entonces esta energía no ha desaparecido, acaba de ser transformada en algo que no sea electricidad.

Constante dieléctrica

Todos los materiales poseen características físicas, químicas o eléctricas, y una de estas características es la constante dieléctrica (ϵ). Esta constante dieléctrica, específica para cada material, se da para una frecuencia específica (10 MHz, por ejemplo) y una temperatura precisa. Específicamente, esta constante dieléctrica indica la capacidad que posee un material para que se cargue eléctricamente y se calcula con respecto a una base de material aislante: el agua, cuya $\epsilon = 1$.

Para calcular la constante, es necesario realizar 3 pasos:

Paso 1: Calcular la tensión

Para ser transferida la energía, el material debe colocarse entre dos electrodos, uno conectado a tierra, el otro sometido a un voltaje alterno de alta frecuencia (HF). La tensión crea un campo eléctrico (E) entre los dos electrodos, expresados en V / m .

Usando la Ecuación 2 de Tensión, se puede calcular este campo eléctrico,

$$E = V/d \quad (1)$$

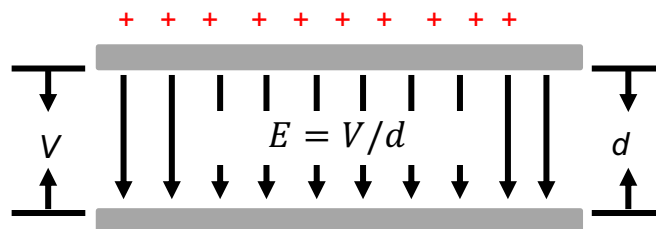


Figura 6. Constante dieléctrica en material termoplástico.

Donde,

- E = tensión
- V = voltaje del campo eléctrico
- d = distancia entre los electrodos

Paso 2: Calcular el desplazamiento eléctrico

Inducción eléctrica (también llamada campo de desplazamiento eléctrico) es un campo del vector denotado por $\vec{D}(\vec{r} * \omega)$ en función de la posición espacial y la frecuencia angular. Se expresa en C / m².

Donde,

- \vec{D} = desplazamiento eléctrico
- \vec{r} = función de la posición en el espacio
- ω = frecuencia angular o pulso electromagnético

Paso 3: Calcular la constante dieléctrica

Usando los dos cálculos realizados, se deduce la expresión $\epsilon = D / E$, que es la constante dieléctrica de un material cuya unidad es en faradios por metro (F/m).

Donde,

- ϵ = constante dieléctrica del material
- D = desplazamiento eléctrico
- E = tensión

Esta constante le permite elegir el mejor material y los mejores parámetros de soldadura, pero también, como es el caso para nuestros dispositivos, calibrar un dispositivo sensor que controle el comportamiento del material y la soldadura.

Como se dijo al principio, la constante dieléctrica depende de la frecuencia, pero también puede variar en base a factores como la humedad, temperatura, estructura o composición del material.

- La humedad, por ejemplo, influye en la constante dieléctrica de un material, porque el agua es un dipolo. De hecho, si hay presencia de agua en una soldadura HF, las moléculas dipolares del agua absorberán la energía eléctrica.
- La Temperatura también puede influir en el comportamiento dieléctrico del material; cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la pérdida dieléctrica.
- La estructura del material es también un factor a considerar, ya que afecta el comportamiento de los dipolos. Un material puede tener una estructura cristalina o amorfa: como parte de una soldadura (HF), es necesario que la estructura del material sea amorfo.

La composición del material también es importante porque la constante dieléctrica de un material compuesto por varios productos depende de las constantes dieléctricas de los diferentes productos que la componen. En general, la presencia o la adición de disolventes o aditivos, polares o salinos, aumentan la pérdida dieléctrica.

Optimización

Para alcanzar la optimización de un proceso de soldadura de termoplástico utilizando la tecnología de alta frecuencia se ha desarrollado una metodología sistemática la cual permite mejorar el proceso de soldadura. La metodología de parametrización del proceso de soldadura termoplástica utilizando sistema de alta frecuencia (HF) ayuda a identificar los parámetros iniciales y elimina el proceso de método tradicional de "prueba y error" minimizando las actividades de proceso que no agregan valor (producto rechazando - pérdida de tiempo de producción siendo el producto meno competitivo en el mercado)

para ser que el proceso sea más rápido y eficiente. Dando paso, a una transformación del producto o servicio en forma funcional pero que a su vez está bien de la primera vez y que al final del proceso satisfaga al cliente y que el proceso sea costo efectivo.

Durante el proceso de soldadura termoplástica utilizando alta frecuencia, existen diversas variables que involucran y comprometen la producción del producto final; las cuales pueden presentar diferentes calidades en los productos terminados. A través de la experiencia se ha utilizado el método tradicional de "prueba y error" para encontrar los valores adecuados para las variables involucradas. Por ello, es necesario que se determine la convergencia de las variables que definan el proceso de producción, la que mejor se conoce como optimización del proceso.

La investigación tiene como fin sustituir la manera del método tradicional de "prueba y error" a una manera más ingenieril y formal para identificar los problemas y aciertos de cada toma de decisión durante la optimización, arranque de moldes nuevos y/o cambio de material para utilizar el mismo molde.

Para optimizar el proceso de soldadura termoplástica utilizando sistema de alta frecuencia (HF) se recomienda utilizar el diagrama de flujo de parametrización del proceso de soldadura termoplástica utilizando sistema de alta frecuencia (HF). Ver la Figura 4-7.

Como punto inicial, hay que tener las especificaciones del producto a soldar, en esta fase se define y se explica la funcionalidad y propósito del producto final y obtener la información correspondiente para verificar o confirmar la compatibilidad con la tecnología de alta frecuencia.

Segunda fase, se prosigue con la identificación de las características, dieléctrica, mecánica y termal del material termoplástico a soldar, el propósito es saber su comportamiento y compatibilidad con la tecnología de radio frecuencia y definición de moldes (electrodos) y calculaciones matemáticas según sus aplicaciones, dando paso a la verificación del diseño ya completado o el nuevo diseño a realizar de los electrodos. En paralelo se verifica las especificaciones del termoplástico provisto por el manufacturero.

Tercera fase, se continúa con las especificaciones de la máquina provista por el manufacturero para la identificación y especificaciones de la prensa de los moldes, tipo y especificaciones de los moldes (electrodos), generadores de HF y sistema de tensión del material; el propósito es entender los rangos de parámetros operacionales disponibles a usarse en los experimentos (DOE), para la identificación de las variables críticas del proceso.

Cuarta fase, se prosigue con las verificaciones de compatibilidad de la máquina vs el producto a soldar, con el propósito de verificar si la máquina puede soldar el producto cumpliendo con las especificaciones requeridas del producto.

Quinta fase, se continúa con las caracterizaciones de las estaciones termales, mecánicas y eléctricas principales de la máquina, que a su vez están relacionadas a las variables significativas (Voltaje HF, Presión y tiempo de soldadura) de un proceso de soldadura termoplástica utilizando tecnología de alta frecuencia.

Sexta fase, se prosigue con los desarrollos de los diseños de experimentos (DOE) para buscar los parámetros óptimos de las variables significativas. (Porcentaje del Capacitor Variable-Voltaje HF, Presión aplicada (Fuerza), Tiempo de Soldadura, Temperatura del Enfriador de los Moldes)

Séptima fase, se evalúan los resultados de los diseños de experimentos (DOE) y se determinan los parámetros óptimos de las variables significativas. Dando paso a confirmar

los parámetros sugeridos y como resultado analizando el proceso estadísticamente. Se evaluará si la capacidad del proceso tiene repetibilidad y consistencia, con un programa de estadística.

En el trabajo de investigación usamos el programa MiniTab para evaluar la capacidad del proceso “Process Capability”.

Como punto de partida, se determinaron las características dieléctricas y mecánicas de los materiales termoplásticos para el proceso de soldadura. Luego se continuó con el desarrollo y análisis de la tecnología de alta frecuencia y procedimientos preliminares de la zona a soldar que permitió identificar los problemas que pueden surgir a la hora o luego de realizar la soldadura.

Sub-siguiente, se expone la caracterización del proceso de soldadura termoplástica que permitió determinar las variables significativas del proceso. Dando paso al desarrollo de los diseños de experimentos que permitieron optimizar las variables significativas del proceso de soldadura termoplástica.

Para los parámetros 150 Kg, 200 Kg, 300 Kg y 450 Kg de la prensa 1, donde se tuvo un promedio de un $Cpk = 4.76$, equivalente a un proceso de 6 Sigma, donde estadísticamente permite observar que el proceso es controlable, confiable y predecible.

- El parámetro 150 Kg, tuvo un Cp 5.22 con un Cpk 3.69, para un 6 Sigma. (Ver Figura 7)
- El parámetro 200 Kg, tuvo un Cp 7.83 con un Cpk 5.90, para un 6 Sigma. (Ver Figura 8)
- El parámetro 300 Kg, tuvo un Cp 5.22 con un Cpk 4.63, para un 6 Sigma. (Ver Figura 9)
- El parámetro 450 Kg, tuvo un Cp 5.87 con un Cpk 4.82, para un 6 Sigma. (Ver Figura 10)

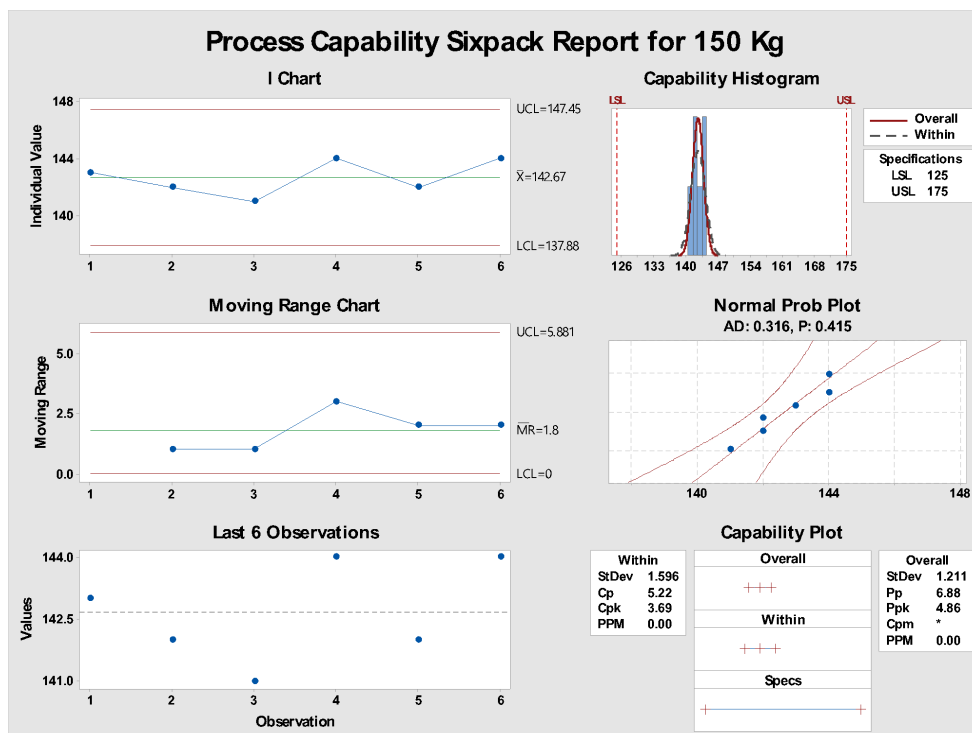


Figura 7. Capacidad del proceso de la prensa 1 a una fuera de 150Kg

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

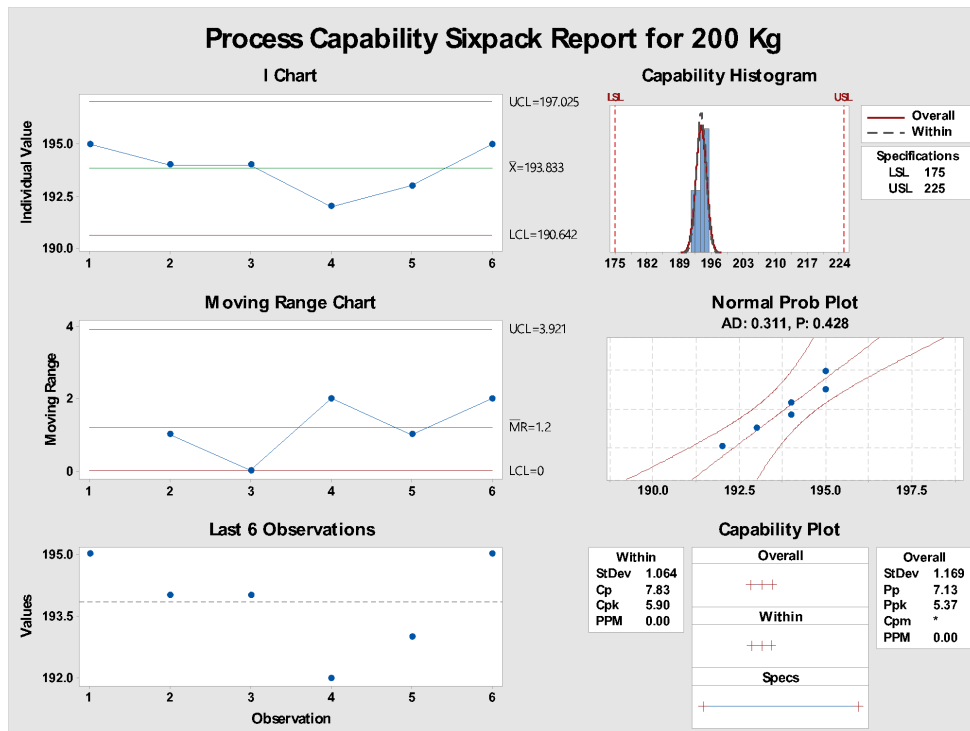


Figura 8. Capacidad del proceso de la prensa 1 a una fuera de 200Kg

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

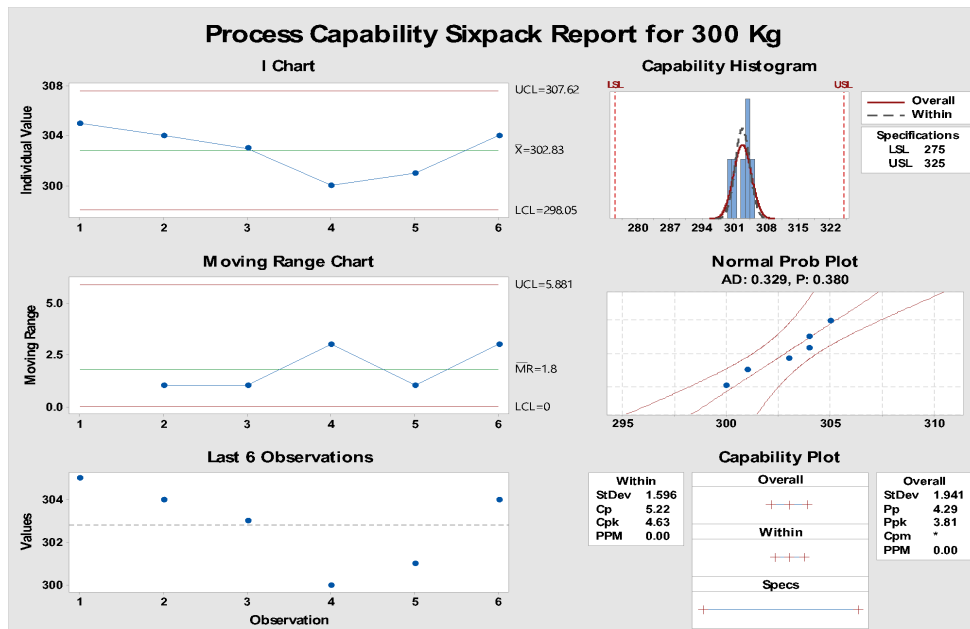


Figura 9. Capacidad del proceso de la prensa 1 a una fuera de 300Kg

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

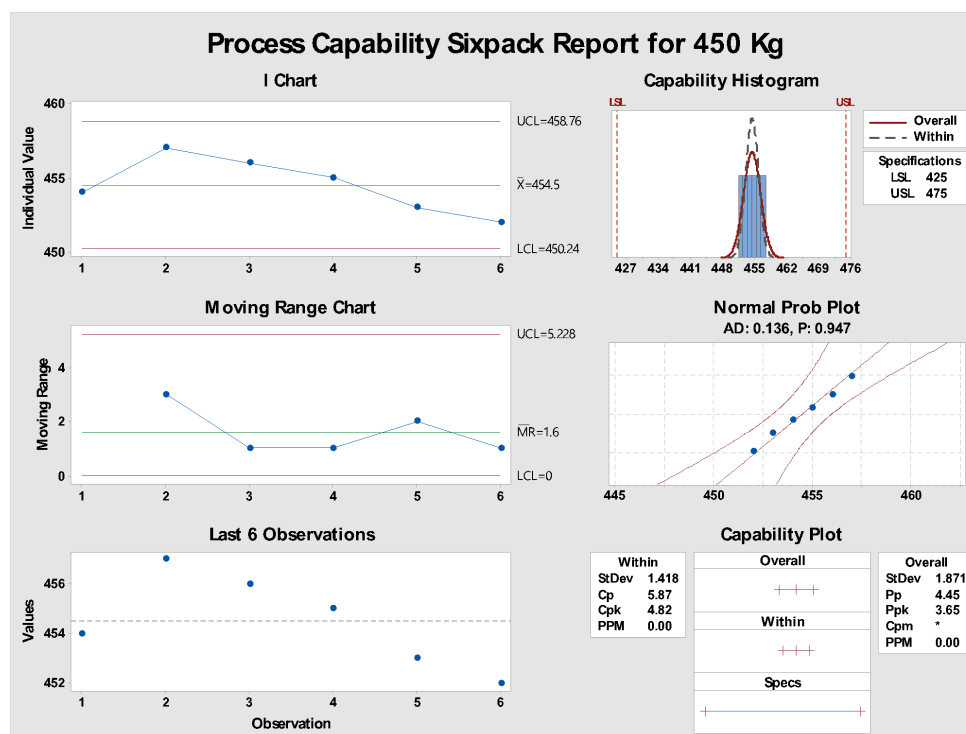


Figura 10. Capacidad del proceso de la prensa 1 a una fuera de 450Kg

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

Para los parámetros 850 Kg, 1050 Kg, 1750 Kg y 1900 Kg de la prensa 2, donde se tuvo un promedio de un Cpk 3.66, equivalente a un proceso de 6 Sigma.

- El parámetro 850 Kg, tuvo un Cp 17.67 con un Cpk 7.75, para un 6 Sigma.
- El parámetro 1050 Kg, tuvo un Cp 4.70 con un Cpk 1.88, para un 5.5 Sigma.
- El parámetro 1750 Kg, tuvo un Cp 4.70 con un Cpk 3.16, para un 6 Sigma.
- El parámetro 1900 Kg, tuvo un Cp 3.92 con un Cpk 1.83, para un 5.5 Sigma.

Basado en los resultados de la caracterización de las prensas, podemos concluir que los comportamientos de las prensas 1 y 2 son de alta eficiencia porque ambas prensas tuvieron unas ventanas de procesos similares, dando paso a una ventana de cualificación con una misma tolerancia para ambas, ya que la tolerancia de los parámetros de fuerza es aproximadamente 8 veces mayor al resultado obtenido en la ventana de cualificación de cada una de las prensas. Dando un resultado de un Cpk de 1.67, donde es equivalente a un proceso de 5 Sigma, obteniendo un proceso mayor a la norma de las industrias, donde el Cpk es de 1.33.

Luego de haber completado los diseños de experimentos (tres factores con tres variables), las variables seleccionadas fueron: Porcentaje del Capacitor Variable, Tiempo de Soldadura y Temperatura del Enfriador de los Moldes (electrodos). Estas variables se analizaron con el programa MiniTab usando la gráfica de efectos principales, donde el análisis de la gráfica de efectos principales se define examinando las diferencias entre las medias de nivel para uno o más factores porque hay un efecto principal cuando diferentes niveles de un factor afectan la respuesta de manera diferente.

En la Figura 11, la gráfica permite ilustrar los efectos principales de las diferentes variables: (Porcentaje del Capacitor Variable, Tiempo de Soldadura (s) y Temperatura (°C) del Enfriador de los Moldes), mostrando como afecta la respuesta (espesor de la soldadura) de manera diferente.

Analizando las variables versus la especificación del producto, donde los valores del espesor de la soldadura deben de estar entre los valores 0.35 milímetros hasta 0.45 milímetros, lo que se debe observar es que cuando la línea no es horizontal (no paralela al eje de X), entonces hay un efecto principal. Los diferentes niveles del factor afectan la respuesta de manera diferente. Mientras más inclinada sea la pendiente de la línea, mayor será la magnitud del efecto principal (espesor de la soldadura).

Obteniendo los resultados, la variable que más afecta al espesor de la soldadura es el Tiempo de Soldadura, porque su pendiente es más agresiva (porque la línea no es paralela al eje X), esta respuesta afirma el resultado que se observó en los experimentos, donde a mayor tiempo de soldadura, el espesor de la soldadura se acercaba al límite inferior de la especificación y si se continuaba aumentando el tiempo en ocasiones había un “flash” en la soldadura (Figura 12). En la Figura 11 también se ilustra que el segundo factor que afecta es la Temperatura de Enfriamiento de los moldes (electrodos), concluyendo que a mayor temperatura (°C) el tiempo de enfriamiento aumenta la fusión de la soldadura, ya que el material se pone más blando antes de aplicar la soldadura. Por último, está el porcentaje del Capacitor Variable, ya que su resultado es casi lineal a la respuesta del espesor de la soldadura, debido a que el capacitor responde a la resistencia del material, pero mientras el material termoplástico va cambiando su estado sólido a estado blando. El efecto del material termoplástico se convierte más conductivo a causa de este efecto el capacitor tiende a controlar más rápido su potencia.

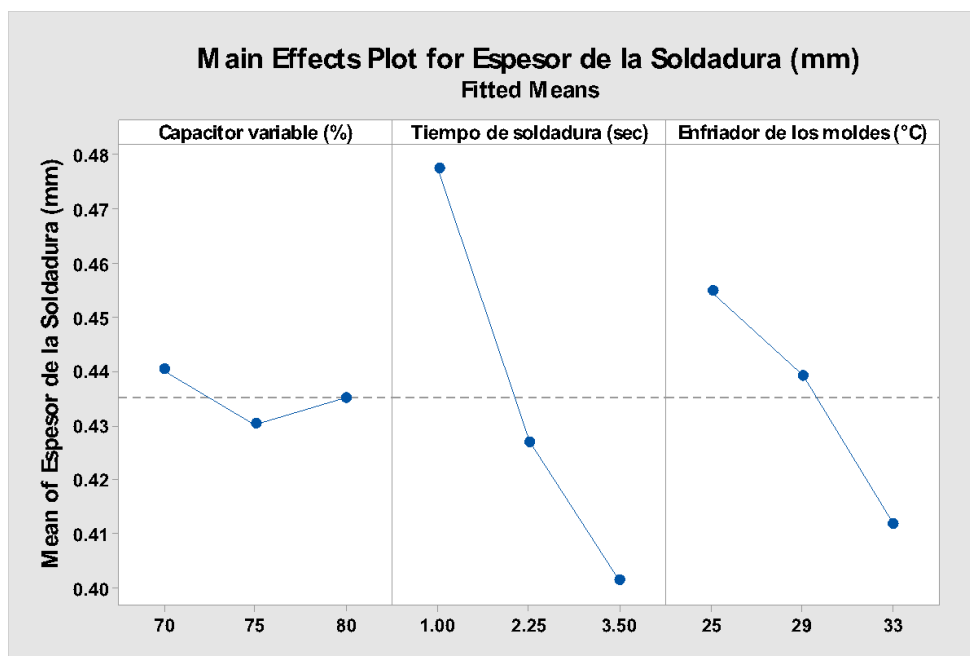


Figura 11. Efectos principales de las tres variables significativas

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

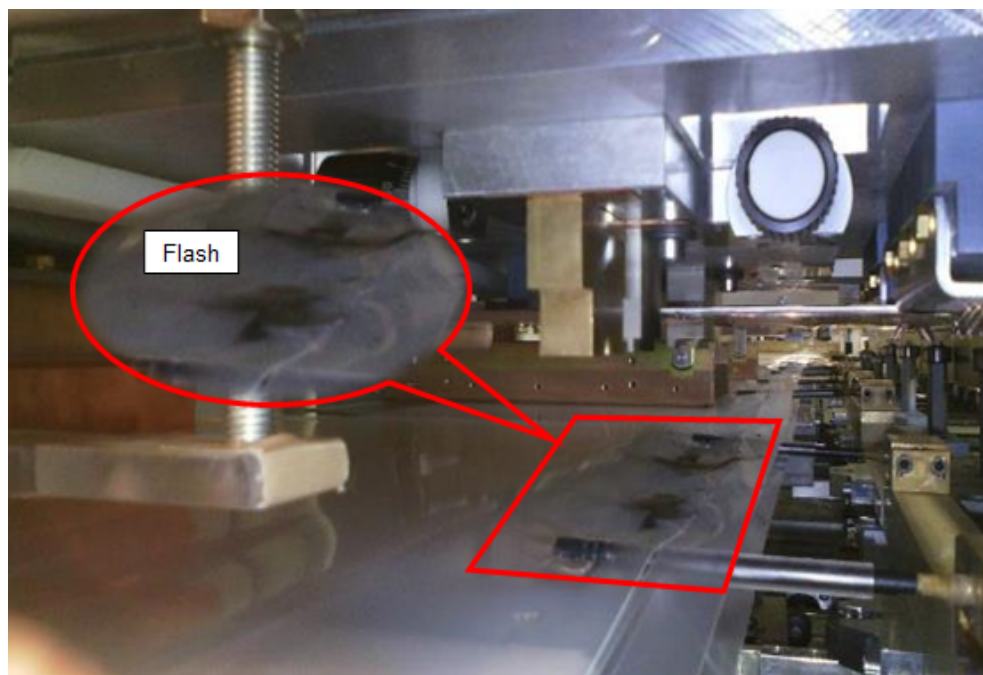


Figura 12. “Flash” efecto en la soldadura por especificación del espesor.

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

Analizando la Figura 13, permite ilustrar las interacciones de las variables para la respuesta, que es el espesor de la soldadura.

Dentro de las tres comparativas, vemos que la combinación que mayor interacción tiene al espesor de la soldadura, es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de enfriamiento de los moldes (electrodos) y el tiempo (s) de soldadura. Esto confirma los resultados obtenidos de los diseños de experimentos y el análisis de la gráfica de efectos principales. Donde estadísticamente permite observar que la respuesta del espesor del material, o sea la fusión del material termoplástico es proporcional a la combinación de la temperatura de los moldes y el tiempo de soldadura, a razón que el enfriador de los moldes (electrodos) tenga mayor temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y el tiempo (s) de soldadura sea mayor el efecto del material termoplástico en llegar a T_m es bien agresivo. La Figura 14 permite observar la fusión del material termoplástico, pero con un exceso de material sobre soldado. En la Figura 15, permite observar la soldadura del material, pero con unas medidas fuera de especificaciones (límite inferior). En adición, la Figura 16, permite mostrar por el método de inspección visual que el comportamiento de la soldadura no es uniforme, porque crea unos defectos en la soldadura donde se de-lamina el material termoplástico. En conclusión, la variable de tiempo de enfriamiento de la soldadura no está siendo eficiente ya que los moldes están calientes y afecta la fusión del termoplástico, teniendo encuentra que el material EVOH es un termoplástico semi-cristalino. Este efecto es porque el tiempo de enfriamiento de la soldadura es el responsable de enfriar la soldadura realizada, para evitar que el material termoplástico semi-cristalino continúe aumentando la temperatura y sobrepasé la zona T_m , donde el efecto es negativo ya que al pasar la zona T_m , el material termoplástico pasa a estado líquido afectando la calidad de la soldadura.

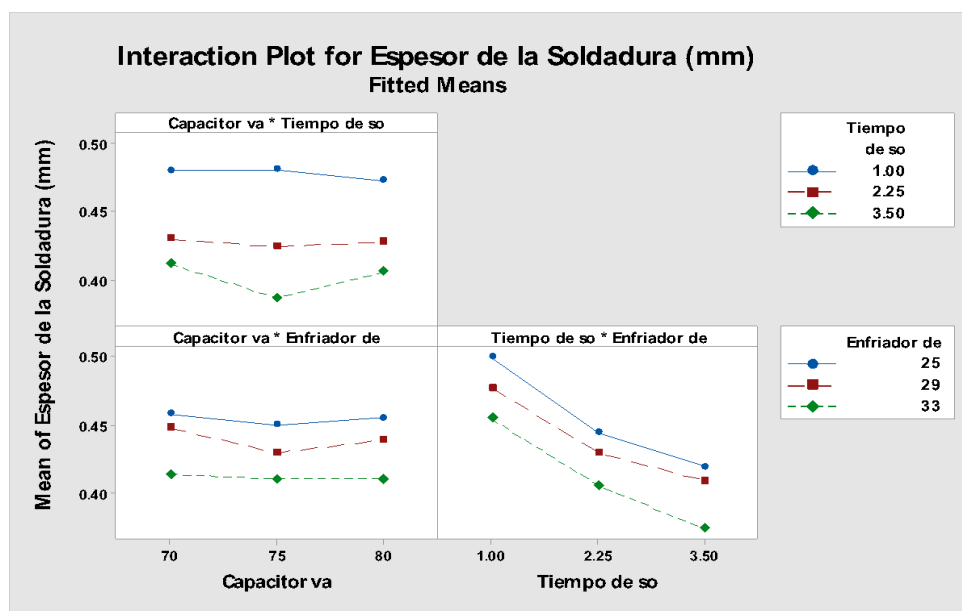


Figura 13. Interacción de las tres variables significativas

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

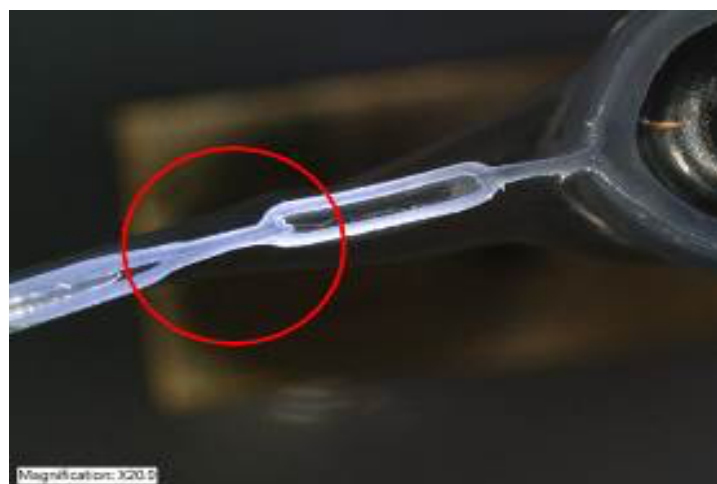


Figura 14. Material sobre soldado con material desplazado

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

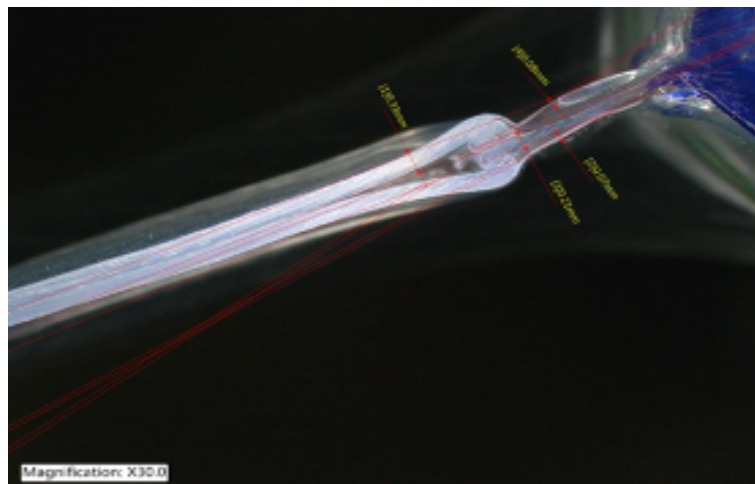


Figura 15. Medidas de material sobre soldado

Nota: Fuente: Elaboración Propia.



Figura 16. Soldadura rechazada por inspección visual

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

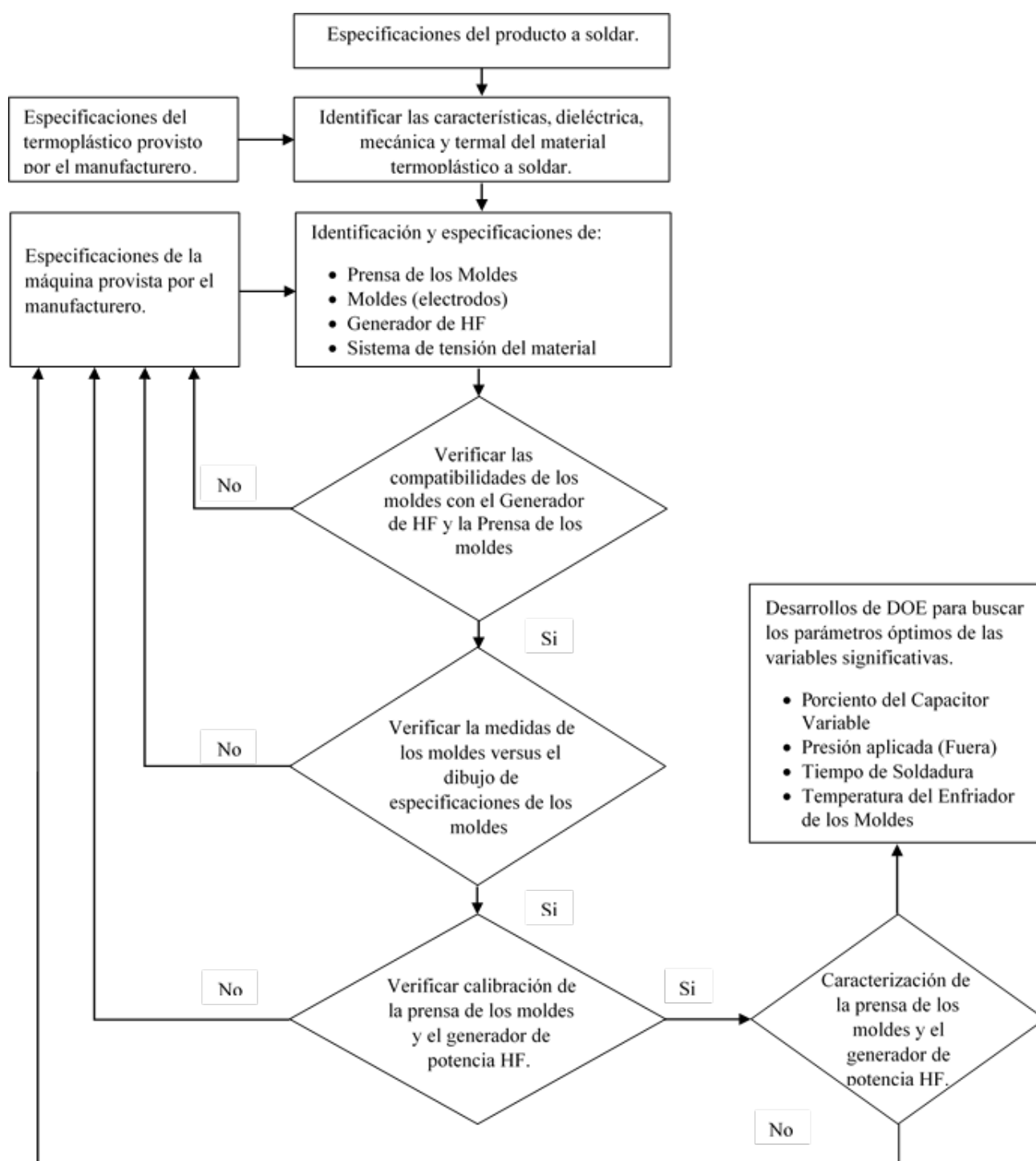


Figura 17. Metodología que permite desarrollar procesos óptimos para procesos utilizando la tecnología de alta frecuencia (HF).

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

Resultados

Con base en los resultados de la investigación de campo se analizaron los datos de las variables significativas.

Parámetro	Valor Mínimo	Valor Promedio	Valor Máximo
Parámetro del % del capacitor variable	70 %	75 %	80 %
Tiempo de soldadura	1 sec.	2.25 sec.	3.5 sec.
Temperatura del enfriador de moldes	25 °C	29 °C	33 °C
Especificación del espesor del material soldado.	0.35 mm	0.40 mm	0.45 mm

Número de Experimento	Capacitor Variable (%)	Tiempo de Soldadura (sec.)	Enfriador de moldes (°C)	\bar{X} de Espesor de Soldadura (mm)	Desviación Estándar (σ)
Experimento #27	70 %	2.25 sec.	33 °C	0.403 mm	0.015 (σ)
Experimento #25	75 %	3.5 sec.	25 °C	0.405 mm	0.010 (σ)
Experimento #7	80 %	3.5 sec.	29 °C	0.418 mm	0.013 (σ)
Experimento #26	70 %	3.5 sec.	29 °C	0.424 mm	0.014 (σ)
Experimento #1	75 %	2.25 sec.	29 °C	0.425 mm	0.012 (σ)
Experimento #15	80 %	3.5 sec.	25 °C	0.427 mm	0.013 (σ)
Experimento #21	70 %	3.5 sec.	25 °C	0.428 mm	0.007 (σ)
Experimento #12	70 %	2.25 sec.	29 °C	0.429 mm	0.015 (σ)
Experimento #22	80 %	2.25 sec.	25 °C	0.431 mm	0.008 (σ)

Figura 18. Resumen de los diseños de experimentos.

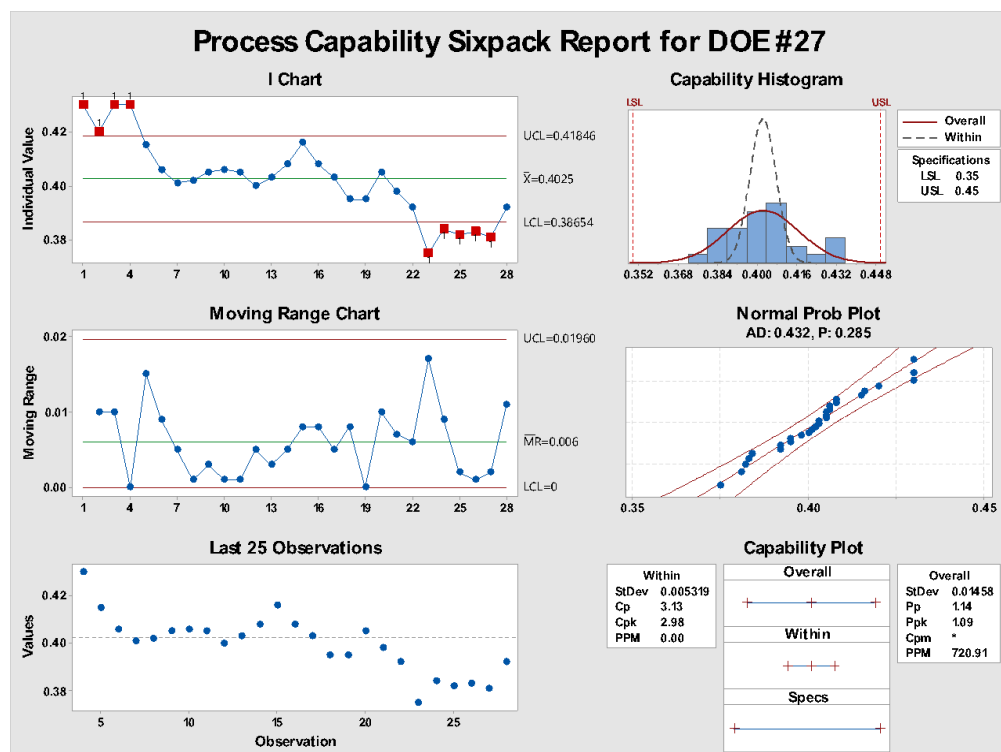


Figura 19. Capacidad del proceso del experimento #27

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

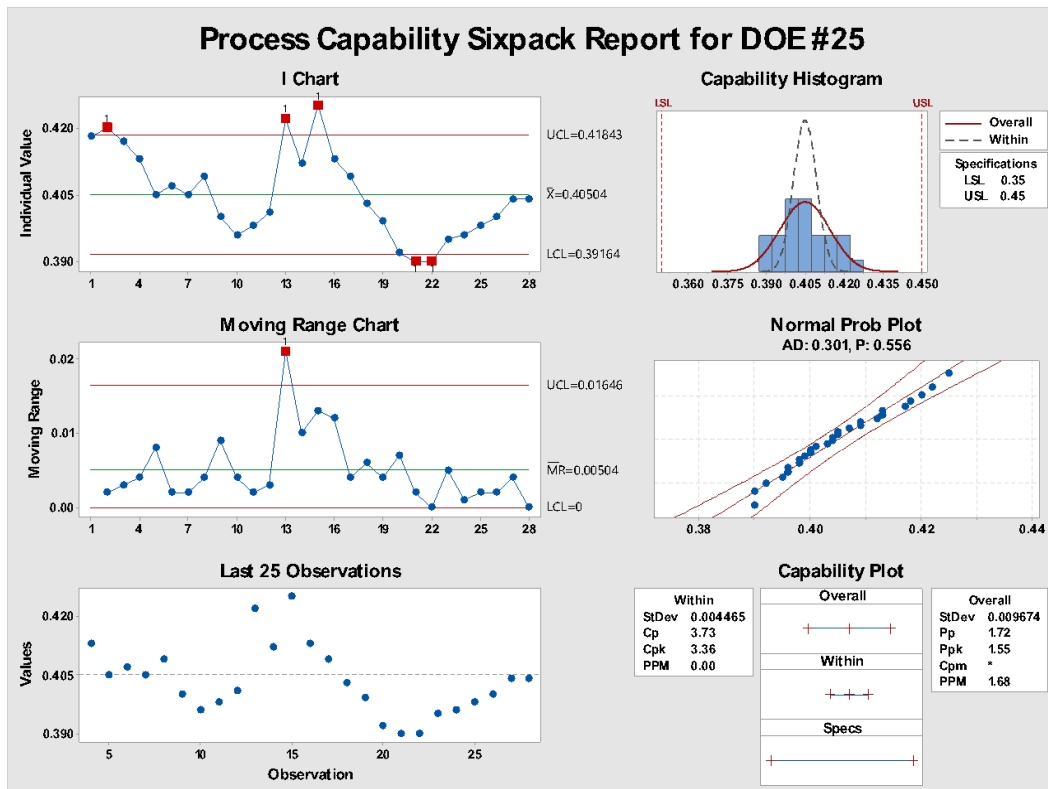


Figura 20. Capacidad del proceso del experimento #25

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

Concluyendo con la información de los resultados de los experimentos realizados, se obtuvo nueve de veintisiete experimentos (Figura 18), donde se cumplieron con los criterios de aceptación (inspección visual y dimensión del espesor de la soldadura). Como resultado de los nueve experimentos que cumplieron con los criterios de aceptación hay dos (experimentos 27 y 25) que se aceptaron para la investigación y validación de parámetros y proceso, porque uno de los criterios más importantes de aceptación es el promedio del espesor de la soldadura y los dos experimentos tuvieron resultados significativos, cumpliendo con el valor nominal de la especificación del espesor de la soldadura (como se muestran en las Figuras 21 a la 23) y permitiendo tener un rango de ajuste en las tres variables (Porcentaje del Capacitor Variable, Tiempo de Soldadura y Temperatura del Enfriador de los Moldes) para las variaciones de procesos. Y como segundo factor importante, se obtuvieron desviaciones estándar de $0.010(\sigma)$ y $0.015(\sigma)$ en el proceso de soldadura del material termoplástico. Finalmente, el experimento #27 muestra en la Figura 19 que el proceso tuvo un Cpk de 2.98 y en la Figura 20 el experimento #25 con un Cpk de 3.36, dando paso a la metodología, donde estadísticamente permite obtener un proceso de 6 Sigma, cumpliendo con un proceso en control, confiable y predecible.



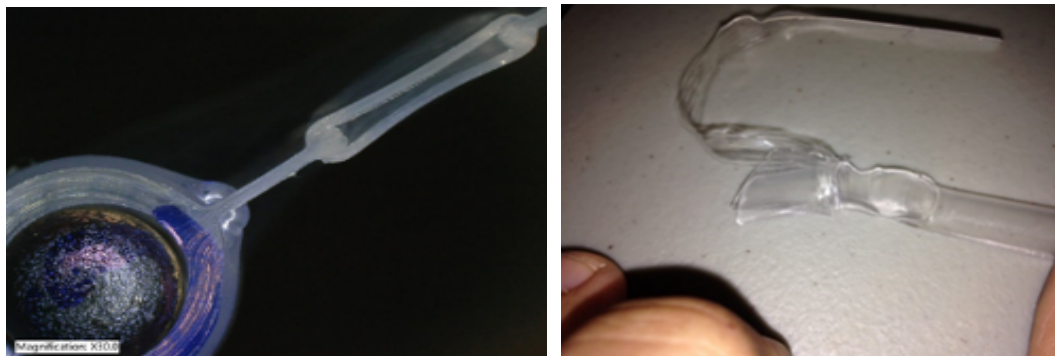
Figura 21. Soldadura aceptable, prueba de desprendimiento de tubo versus la capa de EVA o EVA/EVOH.

Nota: Fuente: Elaboración Propia.



Figura 22. Soldadura aceptable, prueba visual

Nota: Fuente: Elaboración Propia.



Figuras 23. Soldadura aceptable, prueba visual y prueba de desprendimiento de tubo versus la capa de EVA o EVA/EVOH.

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

Discusión y conclusiones

En la investigación de campo se concluye, que a partir del presente trabajo se observó que en diferentes empresas manufactureras en la fabricación de máquinas de soldaduras termoplásticas utilizando alta frecuencia, se realiza un proceso interno para calcular los generadores de potencia alta frecuencia (HF) en base a su conocimiento, tecnología y experiencia, pero no se lleva a cabo una metodología estándar para poner en marcha la máquina con el producto.

Los parámetros encontrados a partir de las caracterizaciones y los diseños de experimentos, difieren en cuestión cuantitativa, por sus diferentes valores, pero en cuestión cualitativa son muy parecidos, y esto se nota ampliamente en las características de la prensa de fuerza y en los generadores de alta frecuencia, donde predecía en que partes de la zona o proceso de la soldadura, la calidad va a ser deficiente y al realizar las soldaduras variando las variables principales se observó que las variables señaladas en diseños de experimentos estaban presentes los rangos de parámetros que influyen directamente en los defectos principales.

El protocolo propuesto en el presente trabajo, se puede aplicar para la obtención de los parámetros más importantes del proceso de soldadura termoplástico con sistema de alta frecuencia en electrodos (moldes) nuevos o cambio de tipo de termoplásticos, esto es importante ya que la mayoría de las veces los electrodos (moldes) son probados cambiando los parámetros aleatoriamente sin que se lleve un control de ello, aunque es necesario la utilización de mucho material en la aplicación del protocolo, pero al final se identifican los valores óptimos a utilizar durante la producción y se tiene un registro de los defectos encontrados con diferentes valores en los parámetros, además es una herramienta que ayudara a optimizar el proceso.

En comparación de la experiencia laboral contra el protocolo, en el primero se puede obtener piezas aceptables en todos los aspectos y sin necesidad de la utilización de mucho material. En la Figura 17 se muestra un diagrama de flujo que se desarrolló durante la investigación, brindando un apoyo para obtener un proceso robusto. Donde permite desarrollar procesos óptimos para procesos utilizando la tecnología de alta frecuencia (HF).

Las desventajas del moldeo científico es el uso de mucho material para realizar las pruebas y el tiempo invertido en ello, además que el moldeo científico no se puede aplicar del todo con materiales termoplásticos de ingeniería.

El análisis estadístico sirve para identificar las variables que afectan a la pieza de una forma cuantitativa, esto toma importancia ya que no se basa en la experiencia del operador.

Referencias

- Naldini, G., Bianco, F., Amado, J., Nolasco, S., Pérez, M. (2016). Radio- Frequency Welder of PVC Tubes for Medical Applications. *IEEE Latin America Transactions*, 14(6), 2700–2701. doi: 10.1109 / TLA.2016.7555241
- Podržaj, P., Čebular, A. (2016). The Application of LVQ Neural Network for Weld Strength Evaluation of RF-Welded Plastic Materials. *IEEE Latin America Transactions*, 21(2), 1063-1071. doi: 10.1109 / TMECH.2015.2498278

- Radio Frequency, Inc. (2019) Cómo funciona la calefacción RF. Retrieved from <https://radiofrequency.com/general-industry/rf-heating/>
- Wiki. (2017) Dipolo eléctrico (GIE). Departamento de Física Aplicada III, Universidad de Sevilla. Retrieved from [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Dipolo_el%C3%A9ctrico_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Dipolo_el%C3%A9ctrico_(GIE))
- UFP Technologies, Inc. (2020) ¿Qué es la soldadura RF (alta frecuencia)? Retrieved from <https://www.ufpt.com/resource-center/rf-high-frequency-welding/>
- Wikiversidad. (2019) Termoplásticos. Retrieved from <https://es.wikiversity.org/wiki/Termopl%C3%A1sticos>
- Ruiz, K. (2017). *Metodología para desarrollar procesos óptimos de soldadura de materiales termoplásticos (EVA y EVA/EVOH) usando el sistema de soldaduras de alta frecuencia (HF)*. (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Internacional Iberoamericana México (UNINI-MX).

Fecha de envío: 21/08/2019

Fecha de revisión: 08/11/2019

Fecha de aceptación: 02/02/2020