



**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS
PARA MINIMIZAR EL TIEMPO DE SOLDADURA
POR ULTRASONIDO DE LA TERMINAL MAK**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA
INGENIERO OCTAVIO MEDINA MONTENEGRO

SAN LUIS POTOSÍ, SAN LUIS POTOSÍ, NOVIEMBRE 2014.

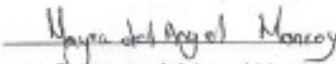


18 de Agosto de 2014

Dr. Guillermo E. Frades Castedo
Coordinador Académico

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Ingeniero Octavio Medina Montenegro, una vez revisada la Tesis titulada: "Determinación de los parámetros para minimizar el tiempo de soldadura por ultrasonido de la terminal MAK", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestro en Manufactura Avanzada durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 18 días de Agosto del año 2014.


M.C. Mayra del Angel Monroy
Asesor Académico


Ing. Boogar Gómez Aguilar
Asesor en Planta



13 de noviembre de 2014

Respetables miembros del Jurado

Me ha tocado el honor de haber sido designado Revisor del trabajo titulado "Determinación de los parámetros para minimizar el tiempo de soldadura por ultrasonido de la terminal MAK" del Ing. Octavio Medina Montenegro,

Después de haber leído detalladamente el trabajo que me fue entregado, he tenido la oportunidad de intercambiar información con el sustentante y como resultado de estas acciones he concluido que:

El trabajo tiene los siguientes aspectos positivos:

- Mejora un proceso industrial, dando parámetros adecuados para un proceso empírico.
- La experimentación se llevó a cabo de manera práctica, dando paso a una validación de la misma.

El trabajo tiene las siguientes oportunidades de mejora:

- Ampliación del diseño de experimentos.
- Un mejor análisis de la soldadura.

Haciendo un análisis crítico del trabajo y balanceando lo positivo y las oportunidades de mejora, considero recomendar al Jurado que le otorgue el

Grado de Maestro en Manufactura Avanzada, al Ing. Octavio Medina Montenegro por lo que acepto se imprima el trabajo de tesis.

No obstante lo anterior, le solicitaría al sustentante me responda las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo se podría mejorar el diseño de experimentos?
2. ¿Hay otras formas de mejorar el proceso?
3. ¿Es significativa la información importante al tomar ese diseño?

Le agradecería al Honorable Jurado tenga en consideración la propuesta de otorgar el Grado que pongo a su consideración.

Atentamente,



Maestro Homero Roldán Rubio

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Carmen y Francisco,
por darme todo lo necesario para
lograr mis metas.

A mi esposa Adriana por el amor,
la motivación y el apoyo
incondicional.

A mi asesora Mayra Del Ángel por
guiarme en el desarrollo de este
trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Glosario	ii
Resumen	iii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del problema	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 Hipótesis	3
Capítulo 2. Marco teórico	4
2.1 Soldadura por ultrasonido	4
2.2 Diseño de experimentos	15
2.2.1 Enfoque clásico	16
2.2.2 Enfoque de Taguchi	18
2.2.3 Enfoque de Shainin®	20
2.3 Análisis de regresión	21
2.3.1 Ajuste de curvas	21
2.3.2 Análisis de regresión	22
2.3.3 El modelo de regresión lineal simple	24
2.3.4 La recta de regresión ajustada	27
2.3.5 Estimación de los coeficientes	28
2.3.6 Regresión polinomial	29
2.4 Investigaciones recientes en soldadura y optimización	32
Capítulo 3. Procedimiento de investigación	48
Capítulo 4. Resultados	53
Conclusiones	63
Recomendaciones	64
Referencias bibliográficas	65
Anexos	

GLOSARIO

Booster. Es la parte, dentro de un equipo de soldadura por ultrasonido, que incrementa o reduce la amplitud de las ondas ultrasónicas.

Crimpado. Proceso por el que se realiza la unión mecánica y eléctrica de un cable con una terminal, implica la deformación plástica de la terminal sobre el cable.

Sonotrodo. Es la herramienta activa de la máquina de soldadura por ultrasonido, es la parte del sistema acústico que se apoya en una de las piezas a soldar, transmitiendo las vibraciones hasta conseguir la unión entre las dos piezas

Transductor. También conocido como convertidor, es el elemento que convierte las ondas eléctricas en mecánicas.

Terminal MAK. Terminal de cobre marca Lear de uso automotriz para aplicaciones de alta corriente, está diseñada para su utilización en el proceso de Soldadura por Ultrasonido.

Ultrasonido. Ondas mecánicas con una frecuencia superior al límite del rango audible del ser humano, es decir, superiores a los 20,000 Hz.

RESUMEN

Palabras clave: Ultrasonido, energía, regresión, experimento.

La soldadura de metales por ultrasonido es un proceso especial de soldadura por presión en frío de conformidad con las normas DIN 8593 y DIN 1910 en las que se clasifica a la soldadura por ultrasonido como una técnica de soldadura en estado sólido; entre la soldadura por presión en frío y soldadura por fricción. En el proceso de soldadura por ultrasonido que se analizó en este trabajo, se realiza la unión eléctrica y mecánica de un cable de cobre con una terminal también de cobre. La principal especificación de la soldadura es la fuerza de desprendimiento mínima que debe soportar la unión y dicha soldadura se debe realizar en el menor tiempo posible a fin de tener un proceso de producción eficiente. Con el objetivo de determinar los parámetros para reducir el tiempo de soldadura y alcanzar el valor requerido de fuerza de desprendimiento, se analizó la influencia de tres parámetros: presión neumática en el sonotrodo, porcentaje de la amplitud de oscilación nominal y energía aplicada. La frecuencia de oscilación es un valor que se mantuvo constante a 20,000 Hz por especificaciones del fabricante de la terminal.

El análisis consta de tres etapas: validación de la capacidad del proceso, determinación del grado de influencia de cada parámetro mediante el Diseño de Experimentos y determinación del valor de energía que cumple con la fuerza de desprendimiento en el tiempo mínimo por medio de un análisis de regresión.

La presión neumática en el sonotrodo, la amplitud de la oscilación del sonotrodo y la energía están directamente relacionadas con la fuerza de desprendimiento; solo energía aplicada influye en el tiempo de soldadura. Con base en lo anterior, la presión neumática y la amplitud de la oscilación se fijaron a su valor máximo para reducir la energía necesaria para alcanzar la fuerza de desprendimiento mínima; por lo tanto la energía es el valor con el que se van a controlar la fuerza de desprendimiento y el tiempo de soldadura y se determinó el rango en el que se va a ajustar la energía.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Dentro de los diversos componentes de un automóvil, el arnés eléctrico es clave para el correcto funcionamiento de todos los sistemas. Es considerado como el sistema nervioso del automóvil, tiene la función de conducir las señales y la energía eléctrica en el auto, desde la batería hasta las luces de frenado, pasando por la caja de fusibles, los faros y un sin número de elementos, la figura 1 muestra un arnés eléctrico.



Figura 1. Arnés eléctrico dentro de un automóvil

Un arnés eléctrico está construido principalmente por cables de cobre de diferentes calibres, los cuales tienen en sus extremos terminales como se aprecia en la figura 2.

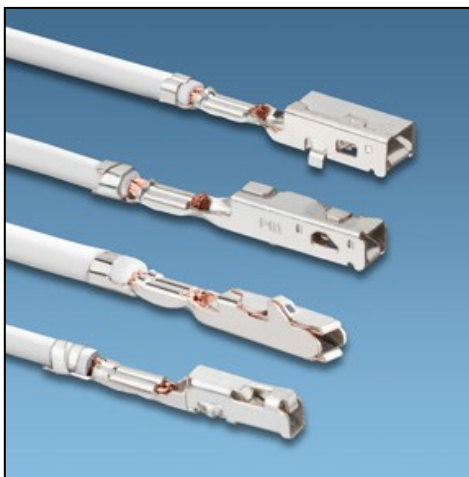


Figura 2. Diferentes tipos de terminales

El proceso tradicional para unir el cable y la terminal se conoce como crimpado e implica una deformación plástica de la terminal.

Existen otras técnicas para realizar la unión una de las cuales es la soldadura por ultrasonido utilizada para la terminal MAK.

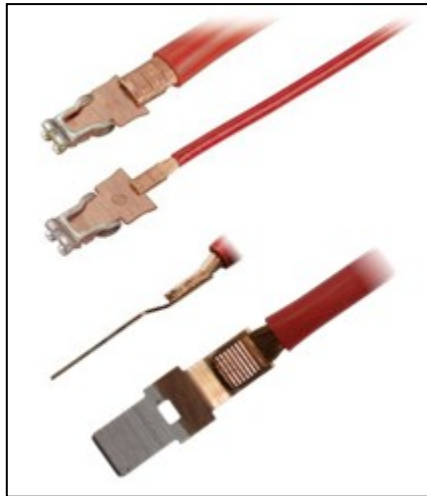


Figura 3. Terminales soldadas por ultrasonido.

1.2 Definición del problema

El ajuste de los parámetros se realiza de forma empírica por prueba y error hasta que la fuerza de desprendimiento sea mayor que la fuerza mínima requerida, esto provoca que los parámetros de proceso se ajusten en niveles más altos de lo requerido, incrementando el tiempo de proceso y acelerando el desgaste de los herramientas.

1.3 Justificación

Día a día se integran en los automóviles sistemas que mejoran el desempeño, la seguridad y la comodidad en ellos; estos sistemas son complejos diseños electrónicos que requieren de señales eléctricas muy precisas y pérdidas de voltaje mínimas en las conexiones.

Un defecto en la soldadura de las terminales MAK provocaría una falla en el sistema eléctrico que limitaría las funciones del automóvil, incluso puede impedir el uso del mismo. Un problema de esta clase representa para la empresa sanciones económicas del orden de centenas de miles de dólares.

La fuerza de desprendimiento de la soldadura por ultrasonido solo puede ser verificada por medio de pruebas destructivas, por tanto es imposible probar todas las piezas producidas, debido a esto es necesario que los parámetros de proceso sean calculados de forma estadística a fin de asegurar que se cumplirá con la fuerza de desprendimiento en el tiempo mínimo a fin de que el proceso cumpla con los requerimientos de calidad y eficiencia.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar estadísticamente los parámetros que incrementan la fuerza de desprendimiento y minimizan el tiempo de la soldadura por ultrasonido de la terminal MAK.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar si todos los parámetros que pueden ser ajustados en el proceso de soldadura por ultrasonido influyen en la fuerza de desprendimiento de la terminal.
2. Definir el modelo estadístico para la fuerza de desprendimiento en función de los parámetros de ajuste del equipo.
3. Calcular el rango de ajuste de los parámetros que minimizan el tiempo de soldadura y permiten cumplir con la fuerza de desprendimiento.

1.5 Hipótesis

1. La falta de un método analítico para determinar los parámetros de la soldadura, incrementa el tiempo del proceso en un 25%.
2. El valor de energía que se define de forma empírica es mayor que la requerida.
3. El valor de fuerza de desprendimiento que se obtendrá se puede ajustar en un rango entre 200 y 500 N por encima del valor mínimo requerido.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Soldadura por ultrasonido

El sonido es la propagación de las ondas de presión en un medio elástico. La propagación de las ondas de sonido está conectada con una deformación del medio de transmisión de tal manera que la deformación se reproduce a través de la interconexión de todas las partículas en el medio [1].

Hay dos tipos básicos de direcciones de movimiento de las partículas oscilantes con respecto a la dirección de la propagación de las ondas:

- Ondas transversales.
- Ondas longitudinales.

La amplitud (rango de oscilación) de una partícula de material en cuestión puede ser descrita por una onda sinusoidal como la de la figura4:

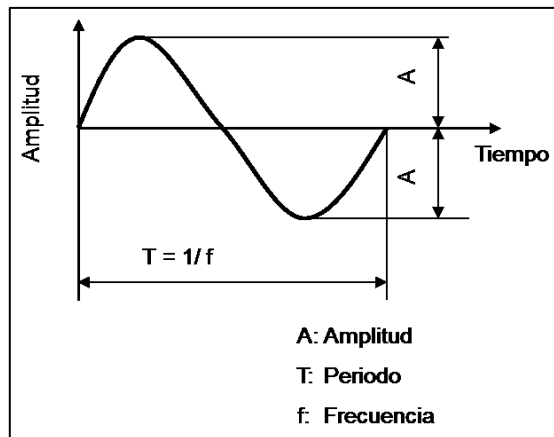


Figura 4. Características de una onda sinusoidal.

Durante la deformación de un medio por una oscilación sinusoidal con un periodo $T = 1/f$, la oscilación se propaga a través de todo el medio. Cuando esto sucede, las partículas se desplazan a intervalos regulares siguiendo en fase la forma de la onda. La distancia más pequeña entre las posiciones iguales de la fase se conoce como longitud de onda.

La velocidad de propagación de la onda de sonido se conoce como la velocidad del sonido c . Dado un cuerpo sólido en forma de barra del material, la velocidad del sonido es una función del módulo de elasticidad E y ρ la densidad del material:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

La frecuencia f de una onda de sonido es una función de la velocidad del sonido c y la longitud de onda λ :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

El sonido puede ser clasificado de acuerdo a los rangos de frecuencia:

- 0 a 20 Hz se llama sonido infra sónico,
- 20 Hz a 20 KHz se llama sonido audible,
- 20 KHz a 500 MHz se llama sonido ultrasónico,
- Mayor que 500 MHz se llama sonido hipersónico.

El ultrasonido es una oscilación mecánica con una frecuencia superior a 20,000 Hz, por lo tanto no es perceptible para el oído humano [1].

La soldadura por ultrasonido es un proceso de soldadura en estado sólido que suelda por la aplicación de vibraciones de energía de alta frecuencia mientras las piezas a soldar están siendo sujetas y sometidas a presión.

El ultrasonido se produce utilizando un generador y un transductor de ultrasonidos. El generador convierte la energía eléctrica de 50/60 Hz en energía eléctrica de 20.000 Hz, por ejemplo, la figura 5 contiene el diagrama de bloques de un generador.

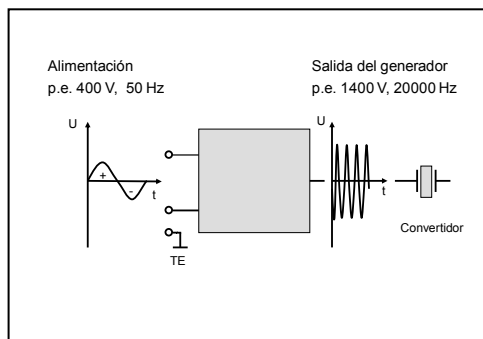


Figura 5. Diagrama a bloques de un generador.

El convertidor convierte la oscilación eléctrica en vibración mecánica. La ingeniería moderna se basa principalmente en métodos electromecánicos para la conversión:

- Transductores piezoeléctricos
- Transductores magneto restrictivos [1].

El efecto piezoeléctrico directo se refiere a la propiedad que ciertos materiales cristalinos exhiben, de cambiar su tensión superficial eléctrica cuando se someten a presión mecánica, la figura 6 muestra un transductor piezoeléctrico.



Figura 6. Transductor piezoeléctrico

Por el contrario el efecto piezoeléctrico inverso se refiere a la propiedad que tienen ciertos materiales cristalinos, de experimentar una deformación mecánica cuando un campo eléctrico se aplica a su superficie [2].

El efecto piezoeléctrico fue descubierto en mono-cristales por Pierre y Jacques Curie en 1880. Se basa en la propiedad piezoeléctrica de cuerpos dieléctricos y proporciona un enlace entre los parámetros mecánicos y eléctricos [2].

La fórmula del efecto piezoeléctrico directo es escribe como:

$$D = d T$$

donde D: densidad de inducción eléctrica

T: tensión mecánica (presión, tracción)

d: piezoeléctrico constante

y la fórmula para el efecto piezoeléctrico inverso:

$$S = d E$$

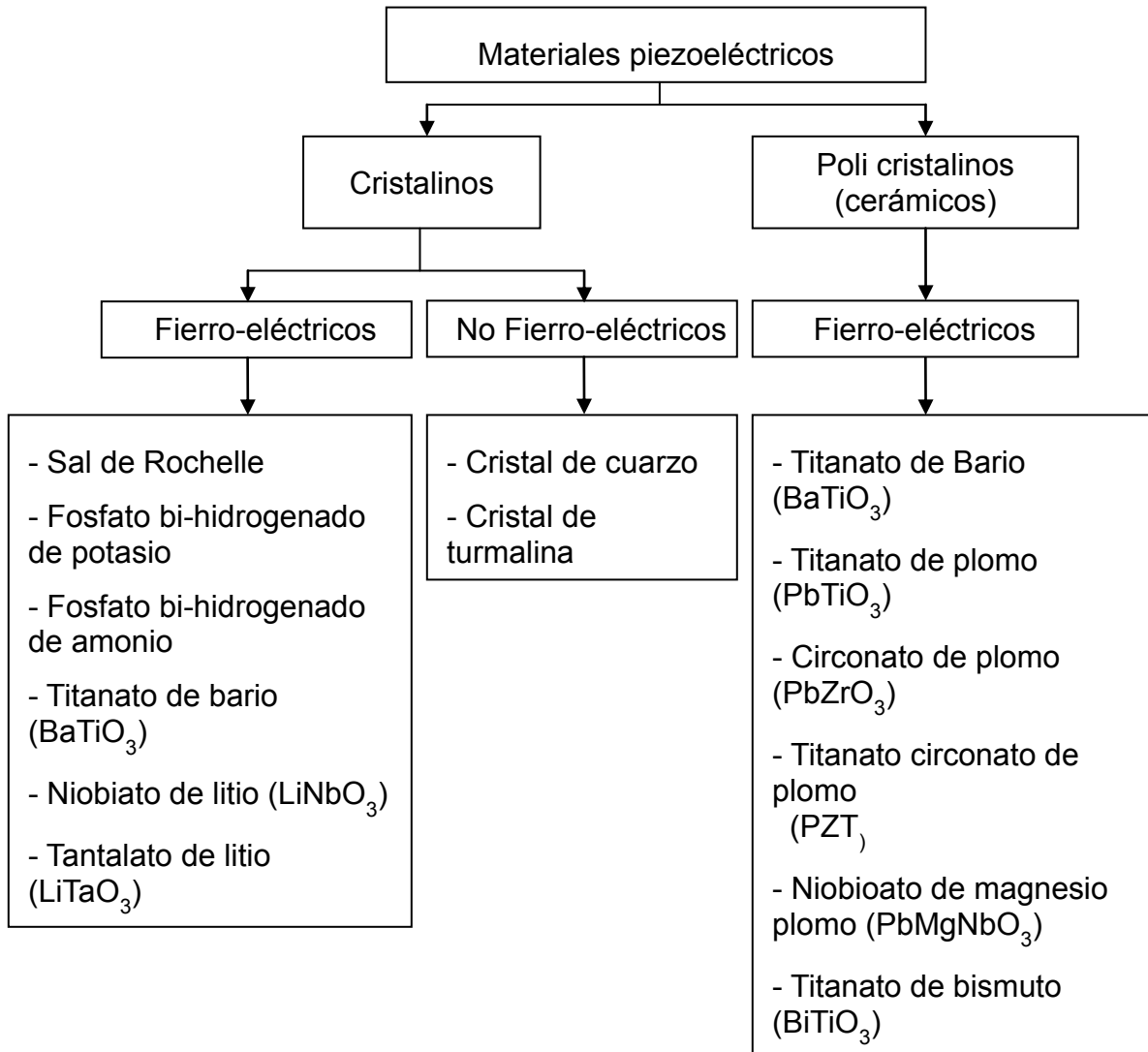
donde E: intensidad de campo eléctrico

S: deformación mecánica (expansión, compresión)

d: piezoeléctrico constante

En general, la relación entre los valores eléctricos y mecánicos se describe mediante las ecuaciones de estado. Dado que los materiales piezoeléctricos son materiales anisótropos, las relaciones mencionadas anteriormente deben ser establecidas para cada eje de simetría. En general, esto conduce a una la matriz [9 x 9] de los coeficientes piezoeléctricos en las ecuaciones piezoeléctricas de estado [3]. Los coeficientes piezoeléctricos se pueden encontrar, por ejemplo, en la documentación del producto de los fabricantes o en la literatura técnica y científica

Hay una gran cantidad de materiales piezoeléctricos, los cuales tienen en común una estructura reticular asimétrica y propiedades no conductoras. El comportamiento piezoeléctrico de cerámica fue descubierto por primera vez en 1946 después de la aplicación de un campo eléctrico a la cerámica de titanato de bario (BaTiO_3), que condujo al desarrollo de un gran número de las cerámicas piezoeléctricas e incluso para el desarrollo de titanato zirconato de plomo (PZT) en 1956. Debido a su aumento de sensibilidad en comparación con titanato de bario (BaTiO_3), así como su estabilidad a altas temperaturas, el circonato titanato de plomo (PZT) es predominantemente utilizado en la actualidad [4].



Para generar la vibración en el sonotrodo, las oscilaciones del convertidor se transmiten al sonotrodo a través del booster, el ensamble de estos tres componentes se muestra en la figura 7.

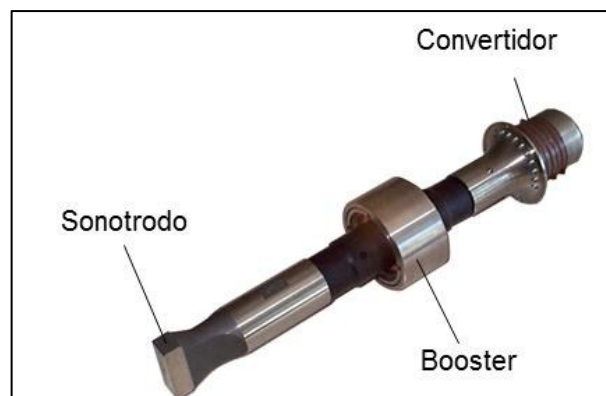


Figura 7. Herramientales de ultrasonido.

La amplitud requerida de la oscilación varía dependiendo del material, tipo de aplicación y el trabajo requerido. Cuando es necesario cambiar la amplitud de la vibración que va al sonotrodo se utiliza un amplificador, como el de la figura 8, que incrementa o decrementa la amplitud. La cantidad de incremento o decremento en la amplitud, se expresa como es una relación conocida como ganancia. La ganancia del amplificador generalmente se ubica entre 0.5:1 y 1:2.5.



Figura 8. Convertidor marca Schunk

El Sonotrodo es la herramienta que transmite la vibración desde el booster hasta las piezas a soldar; es, junto con el yunque una de las piezas que sujetan a presión los materiales que se soldaran, la figura 9 muestra un sonotrodo de la compañía Schunk.

Dependiendo de la geometría de las piezas que se están soldando, hay numerosas variaciones de sonotrodos que difieren principalmente con respecto al diseño de la superficie de trabajo, los sonotrodos usualmente están hechos de acero, también se pueden encontrar sonotrodos con aplicaciones de titanio o aluminio. El sonotrodo y el yunque tienen superficies ásperas o superficies fresadas con estrías cruzadas para apretar las piezas que se ensamblarán y prevenir deslizamientos indeseables. El sonotrodo está sintonizado para operar en el modo longitudinal pero un diseño impreciso puede afectar las características dinámicas del dispositivo, reduciendo tanto la amplitud de vibración como la calidad de la soldadura.



Figura 9. Sonotrodo marca Schunk

Durante el proceso de la soldadura ultrasónica de metales, se involucran fuerzas estáticas, fuerzas cortantes de oscilación y un moderado incremento de temperatura en el área a soldar. La magnitud de estos factores depende del grosor de las piezas a unir, de su estructura superficial y de sus propiedades mecánicas. Las piezas de trabajo son localizadas entre el yunque que es una pieza fija y el sonotrodo que oscila horizontalmente a alta frecuencia (usualmente 20, 35 o 40 kHz) durante el proceso de soldado, como se muestra en la Figura 10.

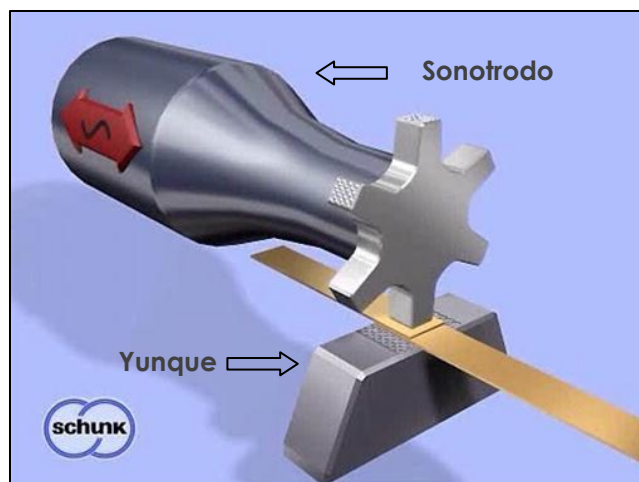


Figura 10. Unión por ultrasonido.

La frecuencia de oscilación más comúnmente usada (frecuencia de trabajo) es 20 kHz. Esta frecuencia permite el mejor uso posible de la energía. Para procesos de soldadura en los que se requiere sólo una pequeña cantidad de energía, puede ser usada una frecuencia de trabajo de 35 ó 40 kHz. El sonotrodo y el yunque tienen superficies

ásperas o tienen generalmente superficies fresadas con estrías cruzadas para apretar las piezas que se ensamblarán y prevenir deslizamientos indeseables.

En el proceso de soldadura se aplica presión estática perpendicularmente a la interfaz a soldar y posteriormente se sobrepone la fuerza cortante oscilante de alta frecuencia (ultrasonido). Las fuerzas dentro de los objetos deben mantenerse por debajo del límite de elasticidad para que las piezas no se deformen. Si las fuerzas sobrepasan un valor de umbral dado, ocurrirá una deformación local en los materiales a unir.

Las piezas se compactan ligeramente en la superficie debido a la fuerza de sujeción antes de conectar la energía ultrasónica; el intervalo durante el cual sucede esto se llama tiempo de exprimido. Después de apagar la energía ultrasónica y reducir la fuerza de sujeción, se aplica una breve ráfaga de energía ultrasónica para evitar que el ensamble soldado se pegue a la herramienta o al yunque. Las vibraciones de alta frecuencia inducen fuerzas cortantes que disminuyen la contaminación superficial de los materiales a unir y producen un enlace puro entre los metales en la interface. La oscilación posterior hace que el área de la soldadura se incremente al mismo tiempo lleva a cabo una difusión atómica en el área de contacto y el metal se recristaliza en una estructura de grano fino similar al que caracteriza a los metales trabajados en frío.

[5]

La soldadura ultrasónica del metal es local y limitada a las fuerzas de corte y al desplazamiento de las capas intermedias. Sin embargo, una fusión no ocurre si la fuerza de presión, la amplitud y el tiempo de la soldadura son ajustados correctamente. Los análisis microscópicos usando microscopios ópticos y electrónicos hacen evidente la re-cristalización, la difusión y otros fenómenos metalúrgicos. Sin embargo, no proporcionan ninguna evidencia de fusión (interfaz fundida). El uso de sensores térmicos altamente sensibles en las capas intermedias muestra un aumento inicial de la temperatura con una posterior disminución constante de la misma.

La temperatura máxima obtenida depende de los ajustes que se hagan a los controles del equipo de soldadura. Un aumento en la energía ultrasónica conduce a un aumento de la máxima temperatura posible. Un aumento en la fuerza estática conduce a un aumento de la temperatura inicial, pero al mismo tiempo limita la posible temperatura máxima. Por lo tanto, el perfil de temperatura puede ser manejado, dentro de ciertos límites, haciendo los ajustes apropiados en la máquina.

La temperatura en la capa intermedia es, por supuesto, también una función de las características del material. La regla básica es que la temperatura obtenida es mayor en los materiales con una conductividad térmica baja, tal como el hierro, y menor para los metales con una conductividad térmica más alta, tal como el cobre y el aluminio. Las medidas de temperatura efectuadas en diversos materiales, con puntos de fusión que varían ampliamente, han mostrado que la temperatura máxima en la interface de la soldadura no excede de un 35 a 50% de la temperatura que derrite al metal individual, cuando se han seleccionado los parámetros de la soldadora apropiadamente. La soldadura ultrasónica de metales no produce una adhesión superficial en los metales. Se ha probado que las uniones son sólidas, homogéneas y duraderas. Si, por ejemplo, una hoja de aluminio fina se suelda ultrasónicamente a una hoja de cobre fina, puede ser observada fácilmente que después de cierto tiempo de soldado, las partículas de cobre aparecen en la cara opuesta a la unión de la hoja de aluminio, al tiempo que las partículas de aluminio aparecen en la cara opuesta a la unión de la hoja de cobre. Esto muestra que los materiales se han penetrado uno a otro, siendo este proceso conocido como difusión. Este proceso ocurre dentro de fracciones de segundo. [5]

La soldadura de metales por ultrasonido es un proceso especial de soldadura por presión de conformidad con las normas DIN 8593 y DIN 1910 en las que se clasifica como una técnica de soldadura por movimiento, junto con la soldadura por presión en frío y la soldadura por fricción.

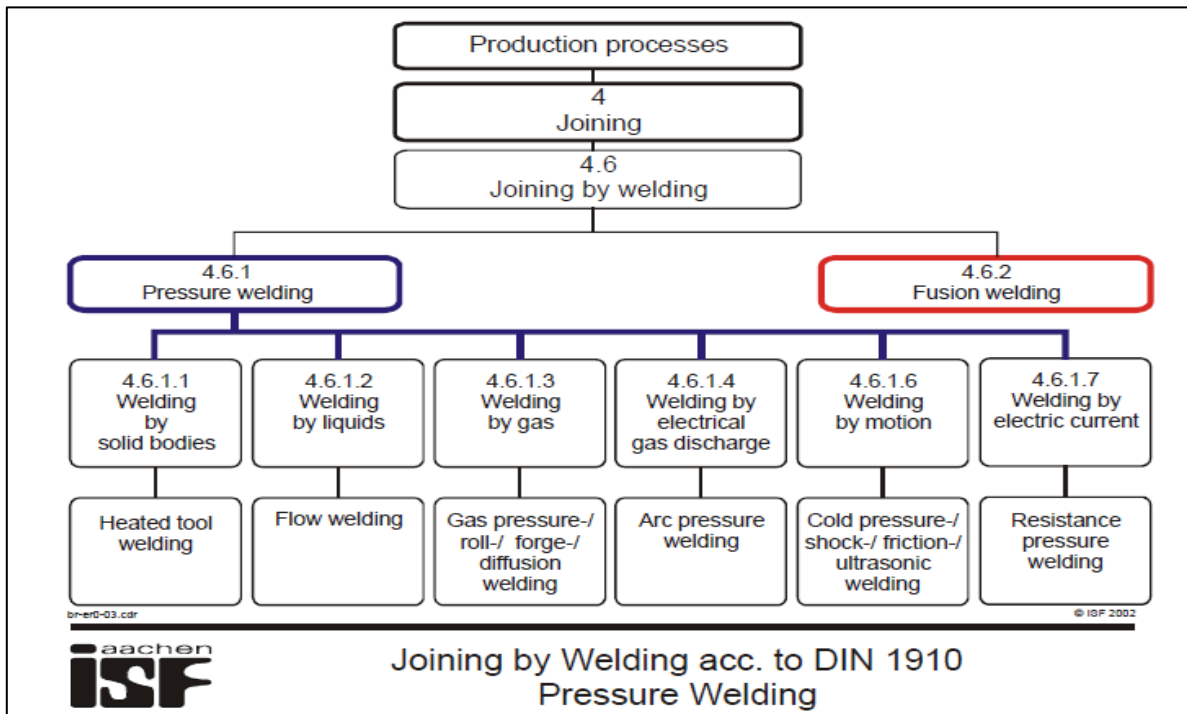


Figura 11. Clasificación de la soldadura por ultrasonido.

Este tipo de soldadura se caracteriza por:

- Altas velocidades de rozamiento de aproximadamente 08 m / s a 20 m / s,
- Baja presión de contacto de aproximadamente 500 N y 2000 N,
- No hay fusión de los materiales,
- Conexión metálica genuina.

En la soldadura ultrasónica, los parámetros de soldadura son:

- Frecuencia del transductor
- La amplitud de la herramienta (sonotrodo)
- Presión de contacto (entre el sonotrodo y el yunque)
- Tiempo
- Energía

La calidad de unión por ultrasonido se determina mediante la prueba de fuerza de desprendimiento entre la terminal y el cable, la terminal se sujeta en un dinamómetro y el cable es jalado por el equipo de prueba a una velocidad constante hasta que se desprende de la terminal, el valor medido por el dinamómetro es la fuerza de

desprendimiento. La apariencia de la unión es también un indicativo de la calidad, esta inspección se realiza de forma visual y la unión no debe tornarse color negro y todos los filamentos del cable deben estar soldados.

El proceso de soldadura se puede dividir en tres pasos:

1) Contacto físico de las superficies:

Las zonas de unión son convergentes debido a la reducción de la altura de las crestas de rugosidad a través de la deformación plástica causada por las fuerzas de cizallamiento oscilante. Al reducir la micro-rugosidad el área de contacto de las piezas a unir se hace cada vez más grande. La convergencia de las zonas de unión continúa hasta el punto de que las fuerzas de enlace físicas tengan efecto [6]. Impurezas perturbadoras, tales como óxido de metal o partículas de polvo se rompen por las fuerzas de cizallamiento oscilante y se eliminan de las áreas de contacto [7]. La fricción y deformación plástica causan un aumento en la temperatura en la zona de contacto que, sin embargo, no es suficiente para producir una fusión de los materiales [6] como se observa en la figura 12. Las características de las terminales se incluyen en los anexos B y C.

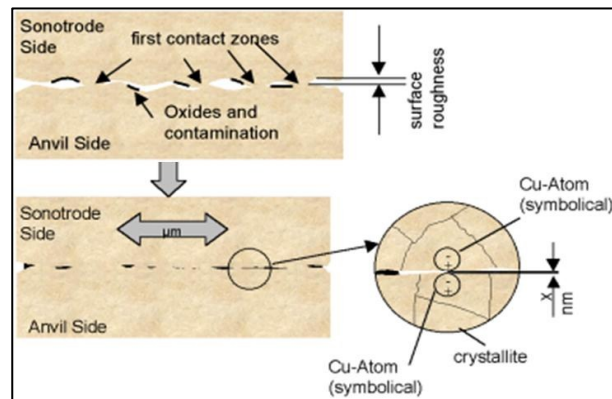


Figura 12. Contacto físico de los materiales de la unión por ultrasonido.

2) La activación de las áreas de contacto y la interacción química:

A una distancia entre las áreas de contacto en el intervalo de 4 a 5 Å (0.5 nm), se produce una activación de las superficies y un intercambio de electrones; creándose un enlace metálico sólido [6].

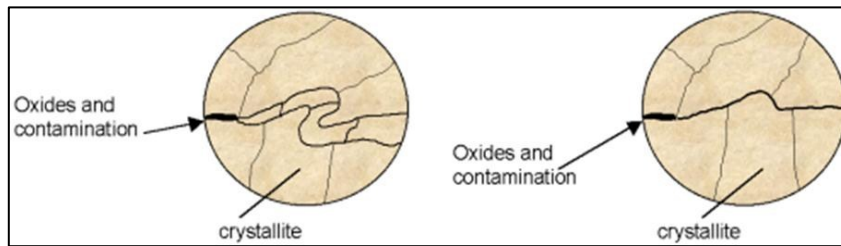


Figura 13. Enlace metálico sólido.

3) Los procesos de liberación de esfuerzos en la unión de la soldadura:

La deformación plástica de las zonas de unión conduce a una deformación elástica del cristallito que desencadena la tensión elástica interna en el material. La difusión atómica en la red de metal, que es causada por el aumento de temperatura en el área de contacto, así como el esfuerzo cíclico de los materiales, conduce a la reducción de dicha tensión (regeneración cristalina) [6].

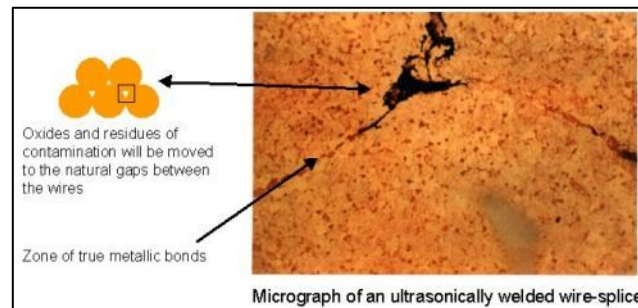


Figura 14. Estructura final de una unión por ultrasonido.

2.2 Diseño de experimentos

A pesar de que la técnica del Diseño de Experimentos (DOE) no surgió hasta el siglo XX, la experimentación es tan vieja como la existencia del hombre. Durante muchos años se utilizó la estrategia de un-factor-por-vez (OFAT), conocida como el método científico y atribuida a Francis Bacon en el siglo XVII, aunque basada en la cultura helénica. La estrategia de un-factor-por-vez consiste en ir modificando cada vez un solo factor (variable) y distinguir los efectos que tiene sobre la respuesta cada factor por separado. Esta estrategia, a pesar de ser la más utilizada en las empresas y seguir el método científico, es ineficiente para hallar las mejores condiciones del proceso. Dicha metodología tuvo su apogeo con Thomas Edison, que aplicó la estrategia OFAT para inventar la bombilla de luz. [8].

Esas estrategias quedaron obsoletas, cuando Sir Ronald Fisher en los años 1920 descubrió un método mucho más eficiente para experimentar basado en los diseños factoriales. El diseño de experimentos fue aplicado por primera vez por Fisher en Inglaterra en la agricultura, y sus experiencias lo llevaron a publicar en 1935, su libro "Design of Experiments" [9]. Sus estudios estaban centrados en mejorar la producción de patatas, trabajando para la Estación Agrícola Experimental de Rothamstede en Londres.

Se entiende el Diseño de Experimentos como "una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación". Más técnicamente, consiste en realizar una serie de pruebas en las que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida elegida [101].

El DOE es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores. Con esta técnica se puede conseguir entre otras cosas, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir su variabilidad o los costos de producción. Todos los tipos de industria se pueden beneficiar de la aplicación del DOE, incluso aquellas de servicio.

Diferentes enfoques al diseño de experimentos

Existen tres enfoques más populares del Diseño de Experimentos: Clásico, Taguchi y Shainin. A pesar de ellos, no es sencillo entender las diferencias entre ellos y decidir correctamente que enfoque es más conveniente. La respuesta a estas preguntas está fuertemente influenciada por el conocimiento y la experiencia que se posee sobre cada enfoque del DOE. Cada uno de los enfoques tiene sus partidarios y detractores, por lo que el debate entre ellos fue durante muchos años muy fuerte y generalmente poco constructivo. A pesar de ello, Deming decía: "Cualquier técnica puede ser útil, si se conocen y entienden sus limitaciones"[12].

2.2.1 Enfoque Clásico

Montgomery [13] considera que hubo cuatro etapas en el desarrollo del diseño de experimentos clásico. La primera etapa, iniciada en los años veinte por Fisher, se caracteriza por la introducción sistemática del pensamiento científico, la aplicación de diseños factoriales y el análisis de varianza (ANOVA) en las investigaciones

experimentales científicas. En la década de los treinta y cuarentas, se introdujeron los diseños factoriales fraccionados, como solución al exceso de experimentos necesarios para llevar a cabo factoriales completos. Estos diseños consisten en elegir una fracción adecuada de un factorial completo. Proveen una manera efectiva y económica de estudiar muchos factores a la expensa de ignorar interacciones de alto orden. Esto se considera de bajo riesgo, ya que las interacciones de alto orden son generalmente insignificantes.

La segunda etapa, iniciada por Box y Wilson [11], se caracteriza por el desarrollo de lo que posteriormente se denominaría como metodología de superficie de respuesta (RSM). Estos autores notaron que los experimentos industriales diferían de los experimentos en la agricultura en dos aspectos, a) inmediatez, porque la respuesta se puede observar bastante rápido, sin tener que esperar tanto como en la agricultura; b) secuencialidad: el experimentador puede realizar unos pocos experimentos y planificar los siguientes experimentos en función de los resultados. Durante los siguientes años, el DOE y el RSM se extendieron a la industria química y a los procesos industriales, en especial en las áreas de investigación y desarrollo (I+D). En esta etapa surgen los diseños para estimar funciones cuadráticas tales como los diseños compuestos centrales (CCD) y diseños de Box-Behnken (BBD).

La tercera etapa comienza a principios de los ochentas, con la aparición de los enfoques de Taguchi y Shainin, presentados como metodologías sencillas y eficientes para la experimentación. La primera reacción fue la crítica a dichos enfoques atacando su validez estadística. A pesar de ello, principalmente los trabajos de Taguchi sobre diseño robusto de parámetros (RPD) sirvieron para difundir el interés y el uso del DOE en otras áreas como la automotriz, industria aeroespacial, electrónica y la industria de semiconductores. Como consecuencia muchos académicos y estadísticos comenzaron a preciar muchas ideas de los nuevos enfoques, lo cual generó un cambio profundo en el enfoque clásico del DOE. Por ejemplo, la reducción de la variabilidad empezó a ser un área de mucha investigación, al igual que el esfuerzo por desarrollar nuevas metodologías y guías para simplificar la aplicación del DOE; lo que dio pie al comienzo de la cuarta etapa del diseño de experimentos en los años noventa en la que actualmente transcurre.

En esta cuarta etapa, la democratización de la estadística, gracias en parte a la expansión del Seis Sigma y la gran oferta de software estadístico, ayudaron a que el DOE fuera aplicado en todos los tipos de industria. En estos últimos años existió un incremento en las publicaciones sobre el Diseño de Experimentos [14], lo cual permitió desarrollar significativamente la técnica. Además de la automatización de los cálculos y gráficas los programas de cómputo (software) han permitido simplificar la técnica para que sea utilizada por más ingenieros y científicos. En esta etapa surge el concepto de optimalidad, lo cual lleva a la utilización de diseños “óptimos”.

En resumen, muchos estadísticos, ingenieros y científicos contribuyeron al desarrollo y aplicación del DOE en las industrias a los largo de estos casi noventa años del enfoque clásico. Esto provocó que dicho enfoque esté consolidado y sea un enfoque válido y robusto para aplicar el DOE.

2.2.2 Enfoque de Taguchi

Como investigador en un laboratorio de control electrónico en Japón, un ingeniero llamado Genichi Taguchi desarrolló en los años cuarenta un método para el Diseño de Experimentos. A pesar de que su primera publicación en japonés data de los años cincuenta, este enfoque al DOE no fue introducido en los Estados Unidos ni en Europa hasta principios de la década de los ochenta. La década siguiente a la aparición de estos métodos en occidente, fue de continuos debates entre los dos bandos: aquellos fanatizados con las nuevas virtudes y potencia del método de Taguchi contra los clásicos que exponían continuamente sus fallas y limitaciones.

Taguchi promovió las técnicas desde una perspectiva enfocada al análisis de problemas de ingeniería, en contraposición con la perspectiva estadística del DOE del momento. Taguchi desarrollo una metodología para la resolución de problemas, a la cual denomino como “Ingeniería de la Calidad” (Quality Engineering) [15]. Lamentablemente, hay una confusión importante en la bibliografía cuando se trata de sistemas que ayudan a reducir la variabilidad, ya que los términos en inglés “Robust Design”, “Taguchi Methods”, “Quality Engineering” y “Parameter design” son utilizados como sinónimos.

Los conceptos básicos sobre los métodos de Taguchi son:

- Un producto de calidad es aquel que causa pérdida mínima a la sociedad durante toda su vida. La relación entre esta pérdida y las características técnicas está expresada en la función de pérdida, que es proporcional al cuadrado de las desviaciones de la respuesta sobre su valor deseado (target value).
- Taguchi desglosa su estrategia de “ingeniería de calidad” en tres fases: Diseño del Sistema, Diseño de Parámetros y Diseño de Tolerancias. El Diseño de Sistemas intenta innovar y averiguar cuáles son los factores y el nivel que deberían operar. El Diseño de parámetros, intenta incrementar el rendimiento de un procesos/producto ajustando los niveles de los factores. Generalmente, se le conoce a esta fase como Método de Taguchi y es la fase más relacionada con el DOE. Finalmente, el diseño de tolerancias intenta determinar los parámetros de control para cada factor y el nivel identificado en la etapa interior.
- Se debe cambiar el objetivo de la experimentación de obtener resultados conforme a las especificaciones a alcanzar un valor deseado minimizando la variabilidad.

Debido a que el Diseño de Experimentos es una herramienta clave para el Diseño de Parámetros [16], Taguchi puso especial énfasis en conseguir que el DOE fuera más sencillo de aplicar. Básicamente, Taguchi simplificó la aplicación del DOE incorporando: un conjunto estándar de diseños experimentales (matrices ortogonales), una herramienta gráfica para asignar los factores al diseño experimental (gráficas lineales), guías para interpretar los resultados (cookbook), maneras de transformar la respuesta para obtener reducción en la variación (S/N ratios), y un método formal para estudiar factores incontrolables utilizando la técnica de diseño robusto. Finalmente, simplificó el análisis de tolerancias con la utilización del DOE.

El principal aporte de Taguchi [17] fue su énfasis en la reducción de la variabilidad. “La calidad es algo que puede ser caracterizado solamente por una media de una característica deseada. La variabilidad de dicha característica debe ser considerada también”. Por ello, propuso la utilización de diseños especiales, en los cuales los factores incluidos en la experimentación podían ser clasificados en dos tipos: Control y Ruido. Los primeros incluyen aquellos factores que pueden ser controlables, mientras que los ruidos son aquellos difíciles o caros de controlar.

La idea básica del Diseño de Parámetros es identificar el nivel apropiado de los factores de control en los cuales el rendimiento del sistema es lo más robusto (insensible) posible a la presencia de los factores ruido. Como el objetivo es hacer el sistema más robusto al ruido, este enfoque es conocido como Diseño Robusto [12].

2.2.3 Enfoque de Shainin

Se llama Sistema Shainin™ a la metodología para la resolución de problemas creada por el ingeniero Dorian Shainin, que murió en el 2000. Shainin describe su colorido método como el enfoque americano para la resolución de problemas, con los mismos objetivos que el enfoque de Taguchi [18].

Shainin consideraba sus ideas como propiedad intelectual, por lo que sólo las vendía a sus clientes para que ellos tuvieran una ventaja competitiva. Como el Sistema Shainin™ está legalmente protegido, sus métodos son raramente discutidos en la bibliografía. Keki R. Bhote fue autorizado a publicar información sobre estos métodos en un único libro.

Debido a que su compañía Motorola, fue galardonada con el premio de Excelencia de Calidad "Malcom Baldrige", dicho premio estipula que los métodos utilizados por la compañía premiada sean compartidos con otras compañías de USA [17]. El interés de sus métodos aumentó significativamente en 1991 con la primera edición de este libro (la segunda edición fue publicada en 2000 [19]).

Dorian Shainin incluyó varias técnicas, algunas nuevas y otras conocidas, en una estrategia coherente, la cual promueve el uso secuenciado de estas herramientas para obtener la mejora de los procesos [20].

Las ideas del enfoque Shainin se basan en:

- Principio de Pareto: Entre todos los muchos factores que influyen en un proceso, existe un factor que es la principal causa de la variación de la respuesta. A este factor se le llama la Red X® y puede ser un factor o la interacción entre dos o más factores. Puede después haber una segunda o tercera causa significativa, las cuales se denominan Pink X® o Pale Pink X® respectivamente.
- Shainin se opone fuertemente al uso de los diseños factoriales fraccionados. En lugar de utilizar dichos diseños que confunden las interacciones, propone identificar

los factores que influyen en la variación y reducir la mayor parte de dicha variación.

- “Habla con las partes. Son más inteligentes que los ingenieros”. Primero, recomienda “hablar” con las partes de la máquina o proceso. Luego, hablar con los trabajadores que están en la línea de producción. Finalmente, se debe recurrir al método menos productivo que es hablar con los ingenieros.

El Sistema Shainin™ presenta muchas herramientas que deben ser aplicadas en forma secuencial para obtener la resolución buscada de los problemas. Esta estrategia de resolución de problemas, puede ser dividida en tres grandes etapas: Generación de claves, DOE Formal y la transición al Control Estadístico de Proceso (SPC). Se comienza la estrategia considerando todas las variables que pueden ser identificadas. Una vez listadas, el primer grupo de herramientas (Multi-Vary, Components Search™, Paired Comparasion™, etc.) intentan generar claves para reducir el número de variable involucradas en el proceso. Dichas herramientas, se basan en la realización de experimentos on-line (sin parar la producción) analizando la variación de la respuesta. En una segunda etapa, la herramienta Variable Search™ es utilizada para experimentar secuencialmente (no aleatoriamente) off-line, basado en los conocimientos del proceso y en la búsqueda binaria. Con ello se consigue reducir aún más el número de variables involucradas, lo que permite la aplicación de diseños factoriales completos. Después, otras herramientas (B vs C™, Response Surface, Scatterplots) son utilizados para confirmar y optimizar los resultados. Finalmente en la última etapa, Positrol™, Process Certification y Pre-Control™ son recomendados para garantizar que los resultados son sostenibles, o sea que los resultados obtenidos serán también obtenidos en el futuro.

2.3 Análisis de regresión

2.3.1 Ajuste de curvas.

Es común que los datos se dan como valores discretos a lo largo de un continuo. Sin embargo, puede ser requerida la estimación de un punto entre valores discretos. Si lo que se requiere es la versión simplificada de una función complicada una manera de hacerlo es calcular valores de la función en un número discreto de valores en el

intervalo de interés. Después, se obtiene una función más simple para ajustar dichos valores. Estas dos aplicaciones se conocen como ajuste de curvas.

Existen dos métodos generales para el ajuste de curvas que se distinguen entre sí al considerar la cantidad de error asociado con los datos. Primero, si los datos exhiben un grado significativo de error o "ruido", la estrategia será obtener una sola curva que represente la tendencia general de los datos. Como cualquier dato individual puede ser incorrecto, no se busca intersecar todos los puntos. En lugar de esto, se construye una curva que siga la tendencia de los puntos tomados como un grupo. Un procedimiento de este tipo se llama regresión por mínimos cuadrados.

Segundo, si se sabe que los datos son muy precisos, el procedimiento básico será colocar una curva o una serie de curvas que pasen por cada uno de los puntos en forma directa. Usualmente tales datos provienen de tablas. Como ejemplos se tienen los valores de la densidad del agua o la capacidad calorífica de los gases en función de la temperatura. La estimación de valores entre puntos discretos bien conocidos se llama interpolación.

Se han encontrado dos tipos de aplicaciones en el ajuste de datos experimentales: análisis de la tendencia y prueba de hipótesis.

El análisis de la tendencia representa el proceso de utilizar el comportamiento de los datos para realizar predicciones. En casos donde los datos son medidas de alta precisión, se usan polinomios de interpolación. Los datos imprecisos se analizan mediante una regresión por mínimos cuadrados. El análisis de la tendencia sirve para predecir o pronosticar valores de la variable dependiente. Esto puede implicar una extrapolación más allá de los límites de los datos observados o una interpolación dentro del intervalo de los datos. Por lo común, en todos los campos de la ingeniería se presentan problemas de este tipo.

Una segunda aplicación del ajuste de curvas experimental en ingeniería es la prueba de hipótesis. Aquí, un modelo matemático existente se compara con los datos obtenidos. Si se desconocen los coeficientes del modelo, será necesario determinar los valores que mejor se ajusten a los datos observados. Por otro lado, si ya se dispone de la estimación de los coeficientes del modelo sería conveniente comparar los valores predichos del modelo con los observados para probar qué tan adecuado es el

modelo. Con frecuencia, se comparan modelos alternativos y se elige "el mejor" considerando las observaciones hechas en forma empírica.

Además de las aplicaciones mencionadas en la ingeniería, el ajuste de curvas es importante para implementar otros métodos numéricos, tales como la integración y la solución aproximada de ecuaciones diferenciales. Por último, las técnicas de ajuste de curvas son útiles para obtener funciones simples con la finalidad de aproximar funciones complicadas.

2.3.2 Análisis de regresión.

En la práctica a menudo se requiere resolver problemas que implican conjuntos de variables de las cuales se sabe que tienen alguna relación inherente entre sí. Por ejemplo, en una situación industrial quizá se sepa que el contenido de alquitrán en el flujo de salida de un proceso químico está relacionado con la temperatura en la entrada. Podría ser de interés desarrollar un método de pronóstico, es decir, un procedimiento que permita estimar el contenido de alquitrán para varios niveles de temperatura de entrada a partir de información experimental. Desde luego, es muy probable que para muchos ejemplos concretos en los que la temperatura de entrada sea la misma, por ejemplo 130°C, el contenido de alquitrán de salida no sea el mismo. Esto es muy similar a lo que ocurre cuando se estudian varios automóviles con un motor del mismo volumen; no todos tienen el mismo rendimiento de combustible. No todas las casas ubicadas en la misma zona del país, con la misma superficie de construcción, se venden al mismo precio. El contenido de alquitrán, el rendimiento del combustible (en millas por galón) y el precio de las casas (en miles de dólares) son variables dependientes naturales o respuestas en los tres escenarios. La temperatura en la entrada, el volumen del motor (pies cúbicos) y los metros cuadrados de superficie de construcción son, respectivamente, variables independientes naturales o regresores. Una forma razonable de relación entre la respuesta Y y el regresor x es la relación lineal, en la que, por supuesto, β_0 es la intersección y β_1 es la pendiente. Esta relación se ilustra en la figura 15.

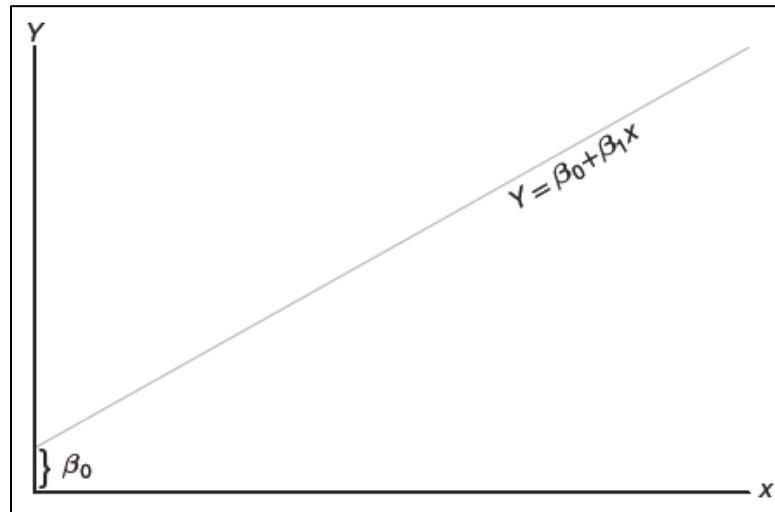


Figura 15. Una relación lineal; β_0 : intersección; β_1 : pendiente.

Si la relación es exacta y no contiene ningún componente aleatorio o probabilístico, entonces se trata de una relación determinista entre dos variables científicas. Sin embargo, en los ejemplos que se mencionaron, así como en muchos otros fenómenos científicos y de ingeniería, la relación contiene un componente aleatorio, es decir, una x dada no siempre produce el mismo valor de y . Como resultado, los problemas importantes en este caso son de naturaleza probabilística, toda vez que la relación anterior no puede considerarse exacta. El concepto de análisis de regresión se refiere a encontrar la mejor relación entre y y x cuantificando la fuerza de esa relación, y empleando métodos que permitan predecir los valores de la respuesta dados los valores del regresor x .

En muchas aplicaciones habrá más de un regresor, es decir, más de una variable independiente que ayude a explicar a y . Por ejemplo, si se tratara de explicar las razones para el precio de una casa, se esperaría que una de ellas fuera su antigüedad, en cuyo caso la estructura de la regresión múltiple se podría escribir como

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$$

Ecuación 1. Ejemplo de regresión múltiple.

Donde y es el precio, x_1 son los metros cuadrados y x_2 es la antigüedad de la casa en años. El análisis resultante se denomina regresión múltiple; en tanto que el análisis del caso con un solo regresor recibe el nombre de regresión simple. En un segundo ejemplo de la regresión múltiple, un ingeniero químico podría estar interesado en la cantidad

de hidrogeno que se ha perdido en las muestras de un metal especifico que se tiene almacenado. En este caso habría dos entradas, x_1 el tiempo de almacenamiento en horas, y x_2 la temperatura de almacenamiento en grados centígrados. De modo que la respuesta seria Y , la perdida de hidrogeno en partes por millón.

La regresión lineal simple, que trata el caso de una sola variable regresora, en el que la relación entre x y y es lineal. Denotemos una muestra aleatoria de tamaño n mediante el conjunto $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$.

Si se tomaran muestras adicionales utilizando exactamente los mismos valores de x , se esperaría que los valores de y variaran. Así, el valor y_i en el par ordenado (x_i, y_i) es el valor de cierta variable aleatoria x_i .

2.3.3 El modelo de regresión lineal simple

Hemos limitado el uso del término *análisis de regresión* a los casos en los que las relaciones entre las variables no son deterministas, es decir, no son exactas. En otras palabras, debe existir un componente aleatorio en la ecuación que relaciona las variables. Este componente aleatorio toma en cuenta consideraciones que no son medibles o, de hecho, que los científicos o los ingenieros no comprenden. En realidad, en la mayoría de aplicaciones de la regresión, la ecuación lineal, digamos, $y = \beta_0 + \beta_1 x$ es una aproximación que representa de manera simplificada algo desconocido y mucho más complicado. Por ejemplo, en el caso que implica la respuesta $Y =$ contenido de alquitrán y $x =$ temperatura de entrada es probable que $y = \beta_0 + \beta_1 x$ sea una aproximación razonable que podría funcionar dentro de un rango limitado de x . La mayoría de las veces los modelos que son simplificaciones de estructuras más complicadas y desconocidas son de naturaleza lineal, es decir, lineales en los parámetros β_0 y β_1 o, en el caso del modelo que implica el precio, el tamaño y la antigüedad de la casa, lineal en los parámetros β_0 , β_1 y β_2 . Estas estructuras lineales son sencillas y de naturaleza empírica, por lo que se denominan modelos empíricos.

Un análisis de la relación entre x y y requiere el planteamiento de un modelo estadístico. Con frecuencia un estadista utiliza un modelo como representación de un ideal que, en esencia, define como percibimos que el sistema en cuestión genero los datos. El modelo debe incluir al conjunto $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$ de datos que implica n pares de valores (x, y) . No debemos olvidar que el valor de y_i depende de x_i por medio de una estructura lineal que también incluye el componente aleatorio. La base para el uso de un modelo estadístico se relaciona con la manera en que la variable

aleatoria y cambia con x y el componente aleatorio. El modelo también incluye lo que se asume acerca de las propiedades estadísticas del componente aleatorio. A continuación se presenta el modelo estadístico para la regresión lineal simple. La respuesta Y se relaciona con la variable independiente x a través de la ecuación

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon$$

Ecuación 2. Modelo estadístico para la regresión lineal simple.

en la cual β_0 y β_1 son los parámetros desconocidos de la intersección y la pendiente, respectivamente, y ε es una variable aleatoria que se supone está distribuida con $E(\varepsilon) = 0$ y $Var(\varepsilon) = \sigma^2$. Es frecuente que a la cantidad σ^2 se le denomine varianza del error o varianza residual.

En el modelo anterior hay varias cuestiones evidentes. La cantidad y es una variable aleatoria, ya que ε es aleatoria. El valor x de la variable regresora no es aleatorio y, de hecho, se mide con un error despreciable. La cantidad ε , que a menudo recibe el nombre de error aleatorio o alteración aleatoria, tiene varianza constante. Es común que a esta parte se le denomine suposición de varianza homogénea. La presencia de este error aleatorio ε evita que el modelo se convierta tan solo en una ecuación determinista. Ahora, el hecho de que $E(\varepsilon) = 0$ implica que para una x específica, los valores de y se distribuyen alrededor de la recta verdadera o recta de regresión de la población $y = \beta_0 + \beta_1 x$. Si se elige bien el modelo, es decir, si no hay otros regresores de importancia y la aproximación lineal es buena dentro de los rangos de los datos, entonces son razonables los errores positivos y negativos que rodean a la regresión verdadera. Debe recordarse que en la práctica β_0 y β_1 se desconocen y que deben estimarse a partir de los datos. Además, el modelo que se acaba de describir es de naturaleza conceptual. Como resultado, en la práctica nunca se observan los valores ε reales, por lo que nunca se puede trazar la verdadera recta de regresión, aunque suponemos que ahí está. Solo es posible dibujar una recta estimada. En la figura 15 se ilustra la naturaleza de los datos (x, y) hipotéticos dispersos alrededor de la verdadera recta de regresión para un caso en que solo se dispone de $n = 5$ observaciones. Debemos destacar que lo que observamos en la figura 16 no es la recta que utilizan el científico o ingeniero. En vez de esa recta, ¡lo que describe la ilustración es el significado de las suposiciones! Ahora describiremos la regresión que el usuario tiene a su disposición.

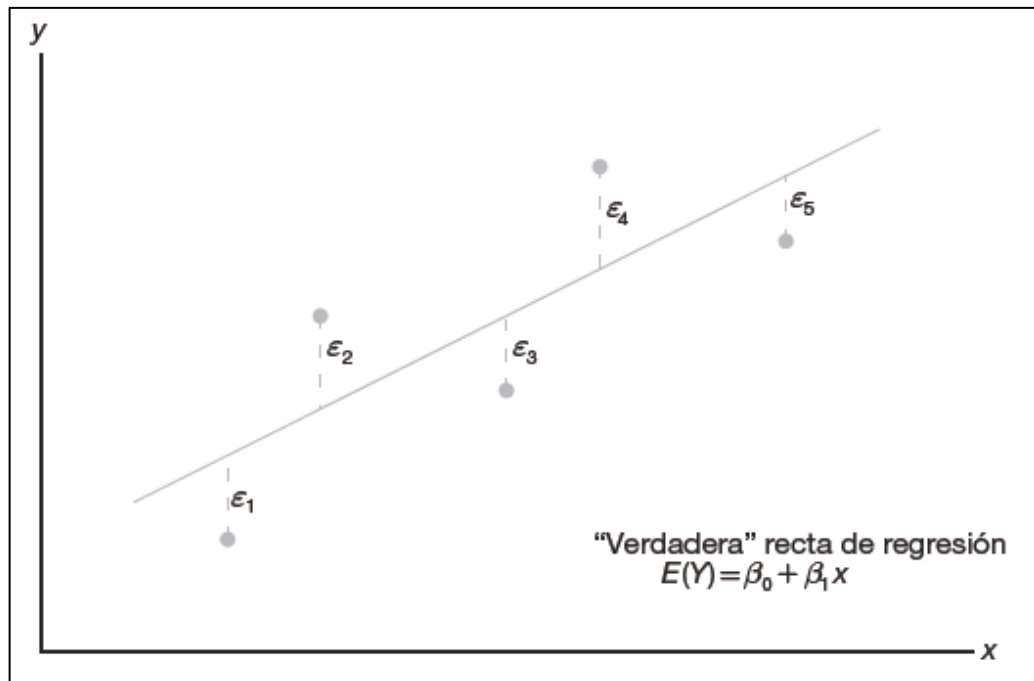


Figura 16. Datos (x, y) hipotéticos dispersos alrededor de la verdadera recta de regresión para $n = 5$.

2.3.4 La recta de regresión ajustada

Un aspecto importante del análisis de regresión es, en términos sencillos, estimar los parámetros β_0 y β_1 , es decir, estimar los llamados coeficientes de regresión. En la sección siguiente se estudiara el método para estimarlos. Suponga que denotamos los estimados b_0 para β_0 y b_1 para β_1 . Entonces, la recta de regresión ajustada, o estimada, es dada por

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x$$

Ecuación 3. Recta de regresión ajustada.

donde \hat{y} es el valor pronosticado o ajustado. Es evidente que la recta ajustada es un estimado de la verdadera recta de regresión. Se espera que la recta ajustada esté más cerca de la verdadera línea de regresión cuando se dispone de una gran cantidad de datos.

En la mayoría de los problemas de investigación en los que se aplica el análisis de regresión se necesita más de una variable independiente para el modelo de regresión. La complejidad de la mayoría de mecanismos científicos es tal que, con el fin de

predecir una respuesta importante, se requiere un modelo de regresión múltiple. Cuando un modelo es lineal en los coeficientes se denomina modelo de regresión lineal múltiple. Para el caso de k variables independientes, el modelo que da x_1, x_2, \dots, x_k , la media de $Y | x_1, x_2, \dots, x_k$ es el modelo de regresión lineal múltiple

$$\mu Y | x_1, x_2, \dots, x_k = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

Ecuación 4. Modelo de regresión lineal múltiple.

y la respuesta estimada se obtiene a partir de la ecuación de regresión muestral

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k$$

Ecuación 5. Ecuación de regresión muestral.

donde cada coeficiente de regresión β_i se estima por medio de b_i , a partir de los datos muestrales, usando el método de los mínimos cuadrados. Como ocurre en el caso de una sola variable independiente, a menudo el modelo de regresión lineal múltiple es una representación adecuada de una estructura más complicada dentro de ciertos rangos de las variables independientes.

También se pueden aplicar técnicas similares de mínimos cuadrados para estimar los coeficientes cuando el modelo lineal incluye, por ejemplo, potencias y productos de las variables independientes. Un ejemplo de esto se presentaría cuando $k = 1$, en cuyo caso el experimentador podría pensar que las medias $\mu Y | x$ no caen sobre una línea recta, sino que se describen de manera más adecuada mediante el modelo de regresión polinomial.

$$\mu y | x = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_r x^r$$

Ecuación 6. Modelo de regresión polinomial.

y la respuesta estimada se obtiene de la ecuación de regresión polinomial

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_r x^r$$

Ecuación 7. Modelo de regresión polinomial.

En ocasiones se genera confusión al decir que un modelo polinomial es un modelo lineal. Sin embargo, los estadistas normalmente se refieren a un modelo lineal como aquel en el que los parámetros ocurren en forma lineal, independientemente de cómo

las variables independientes entran en el modelo. Un ejemplo de modelo no lineal es la relación exponencial

$$\mu Y | x = \alpha \beta^x$$

Ecuación 8. Modelo no lineal de relación exponencial.

que se estima mediante la ecuación de regresión

$$\hat{y} = ab^x$$

Ecuación 9. Ecuación de regresión.

En ciencias e ingeniería hay muchos fenómenos cuya naturaleza no es inherentemente lineal y, cuando se conoce su verdadera estructura, no hay duda de que habría que intentar ajustar el modelo real. Existe mucha literatura acerca de la estimación de modelos no lineales por medio de mínimos cuadrados. Los modelos no lineales que se analizan en este capítulo se relacionan con condiciones no ideales, en las cuales el analista está seguro de que la respuesta y , por lo tanto, el error de respuesta del modelo no se distribuyen normalmente sino que, más bien, tienen una distribución binomial o de Poisson. Estas situaciones ocurren a menudo en la práctica [21].

2.3.5 Estimación de los coeficientes

En esta sección se calculan los estimadores de mínimos cuadrados de los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ mediante el ajuste del modelo de regresión lineal múltiple

$$\mu Y | x_1, x_2, \dots, x_k = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

Ecuación 10. Ajuste del modelo de regresión lineal múltiple.

a los puntos de los datos

$$\{(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, y_i); \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ y } n > k\}$$

donde y_i es la respuesta observada a los valores $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ de las k variables independientes x_1, x_2, \dots, x_k . Se supone que cada observación $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, y_i)$ satisface la siguiente ecuación:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i$$

Ecuación 11. Ajuste del modelo de regresión lineal múltiple.

o bien,

$$y_i = \hat{y}_i + e_i = b_0 + b_1x_{1i} + \dots + b_kx_{ki} + e_i$$

Ecuación 12. Modelo de regresión lineal múltiple

donde ε_i y e_i son el error aleatorio y el residual, respectivamente, asociados con la respuesta y_i y con el valor ajustado \hat{y}_i

Como en el caso de la regresión lineal simple, se supone que los e_i son independientes y están distribuidos en forma idéntica con media cero y varianza común σ^2 . Si usamos el concepto de mínimos cuadrados para obtener los estimados b_0, b_1, \dots, b_k , minimizamos la expresión

$$SCE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_{1i} - \dots - b_kx_{ki})^2$$

Ecuación 13. Concepto de mínimos cuadrados.

Si, a su vez, diferenciamos la SCE respecto a b_0, b_1, \dots, b_k , e igualamos el resultado a cero, generamos el conjunto de $k + 1$ ecuaciones normales para la regresión lineal múltiple.

$$\begin{array}{cccccc} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} & + & b_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} & + & \dots & + & b_k \sum_{i=1}^n x_{ki} & = & \sum_{i=1}^n y_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 & + & b_2 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} & + & \dots & + & b_k \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{ki} & = & \sum_{i=1}^n x_{1i}y_i \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{ki} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{1i} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{2i} & + & \dots & + & b_k \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 & = & \sum_{i=1}^n x_{ki}y_i \end{array}$$

Estas ecuaciones se pueden resolver para b_0, b_1, \dots, b_k , utilizando cualquier método apropiado que permita resolver sistemas de ecuaciones lineales. Casi todos los programas estadísticos de cómputo se pueden utilizar para obtener soluciones numéricas de las ecuaciones anteriores.

2.3.6 Regresión polinomial

Ahora suponga que se desea ajustar la ecuación polinomial

$$\mu y|x = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \dots + \beta_r x^r$$

Ecuación 14. Ecuación polinomial.

a los n pares de observaciones $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$. Cada observación, y_i satisface la ecuación

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_r x_i^r + \varepsilon_i$$

Ecuación 15. Ecuación polinomial para n observaciones.

O bien,

$$y_i = \hat{y}_i + e_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 x_i^2 + \dots + b_r x_i^r + e_i$$

Ecuación 16. Modelo polinomial.

donde r es el grado del polinomio y ε_i y e_i son, de nuevo, el error aleatorio y el residual asociados con la respuesta y_i y con el valor ajustado \hat{y}_i , respectivamente. Aquí el número de pares, n , debe ser al menos $r + 1$, que es el número de parámetros por estimar.

Observe que el modelo polinomial se puede considerar un caso especial del modelo de regresión lineal múltiple más general, donde establecemos $x_1 = x$, $x_2 = x^2, \dots$, $x_r = x^r$

Las ecuaciones normales adoptan la misma forma que las utilizadas en la regresión lineal múltiple.

2.4 Investigaciones recientes sobre soldadura por ultrasonido

El campo de la soldadura ultrasónica de metales es uno de los temas tratados en la fabricación de accesorios utilizados en aplicaciones automotrices y eléctricas, y varios investigadores han reportado sus hallazgos sobre el mecanismo de formación conjunta, distribución de la temperatura en la interface y fuerza de unión. Algunas de las observaciones importantes se presentan a continuación.

Junhui Li et al. [22] explica la sección del transductor, la transmisión de vibración y la potencia de los equipos. La transmisión de la vibración ultrasónica es un problema muy crítico y complejo en el equipo de soldadura. Mediante el control de la frecuencia de la señal ultrasónica, el desplazamiento de la vibración y el control de la fase, se puede conseguir el aumento de la densidad de desplazamiento, la velocidad y la energía de la vibración ultrasónica. Utilizando un transductor de una sección transversal menor se tienen mejoras en las características de acoplamiento, las características de la micro estructura, la mecánica y el rendimiento electrónico.

Tarng et al [23] presentó una aplicación de la lógica difusa utilizando el método de Taguchi para la optimización del proceso de soldadura por arco con múltiples características de rendimiento. Para seleccionar una matriz ortogonal apropiado para experimentos, el total de grados de libertad deben ser calculados. Los grados de libertad se definen como el número de comparaciones entre parámetros del proceso que se deben hacer para determinar qué nivel es mejor y, específicamente, cuán mejor es. Por ejemplo, un parámetro de proceso de dos niveles cuenta con un grado de libertad. Los grados de libertad asociados con la interacción entre dos parámetros de proceso están dados por el producto de los grados de libertad para los dos parámetros del proceso. Por lo tanto, hay cinco grados de libertad, debido a los cinco conjuntos de parámetros de soldadura en el proceso de soldadura por arco sumergido. En la tabla 1 se presentan la matriz con los parámetros de la soldadura.

Tabla 1. Parámetros de soldadura y sus niveles.

Símbolo	Parámetro de soldadura	Unidades	Nivel 1	Nivel 2
A	Corriente del arco	A	450	550
B	Voltaje del arco	V	28	30
C	Velocidad de la soldadura	cm min ⁻¹	30	40
D	Saliente del electrodo	mm	19	25
E	Temperatura de pre-calentamiento	°C	185	215

Una vez que se conocen los grados de libertad, el siguiente paso es seleccionar una matriz ortogonal apropiada. Los grados de libertad para la matriz ortogonal deben ser mayor que, o al menos igual a los parámetros de proceso.

En este estudio, se utilizó una matriz ortogonal L_8 con cinco columnas y ocho filas. Esta matriz tiene siete grados de libertad y puede manejar los parámetros del proceso de dos niveles. Cada parámetro de soldadura se asigna a una columna y hay disponibles ocho combinaciones de los parámetros de soldadura. Por lo tanto, sólo se requieren ocho experimentos para estudiar todos los parámetros de soldadura utilizando la matriz ortogonal L_8 . La matriz ortogonal L_8 de los parámetros de soldadura se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz ortogonal L_8 .

Experimento	Nivel de los parámetros de soldadura				
	A Corriente del arco	B Voltaje del arco	C Velocidad de soldadura	D Saliente del electrodo	E Temperatura de pre-calentamiento
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2
3	1	2	2	1	1
4	1	2	2	2	2
5	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1
7	2	2	1	1	2
8	2	2	1	2	1

La tabla 3 muestra los resultados experimentales para la tasa de deposición y su relación señal-ruido basado en el diseño de experimentos (Tabla 2). Los resultados experimentales para la dilución y su relación señal-ruido se muestran en la tabla 4. Como se muestra en las tablas 3 y 4, las unidades para describir la tasa de deposición y la dilución son diferentes. Para considerar las dos características de rendimiento diferentes en el método de Taguchi, las relaciones de señal a ruido correspondientes a la tasa de deposición y la dilución se procesan por la unidad de lógica difusa.

Tabla 3. Resultados para la tasa de deposición y la relación S/N.

Experimento	Tasa de deposición (kg h ⁻¹)	Relación S/N
1	5.34	14.55
2	7.57	17.58
3	6.88	16.75
4	7.47	17.47
5	8.00	18.06
6	8.58	18.67
7	7.74	17.77
8	8.37	18.45

Tabla 3. Resultados para la dilución y la relación S/N.

Experimento	Dilución (%)	Relación S/N
1	16.50	-24.35
2	12.10	-21.66
3	19.00	-25.58
4	10.00	-20.00
5	16.00	-24.08
6	12.80	-22.14
7	17.10	-24.66
8	15.50	-23.80

En este trabajo, el valor no difuso y_0 se denomina índice de rendimiento multirespuesta (MRPI). Cuanto mayor sea el índice de rendimiento multirespuesta, mejor es la característica de rendimiento. La tabla 4 muestra los resultados experimentales para el índice de rendimiento multirespuesta usando el diseño de experimentos (Tabla 3).

Puesto que el diseño de experimentos es ortogonal, es entonces posible separar el efecto de cada parámetro de soldadura a diferentes niveles. Por ejemplo, la media del índice de rendimiento multirespuesta para la corriente de arco en los niveles 1 y 2 se puede calcular promediando los índices de rendimiento multirespuesta para los experimentos 1 a 4 y 5 a 8, respectivamente (tabla 3). La media del índice de rendimiento multirespuesta para cada nivel de los otros parámetros de soldadura se calcula de una manera similar. La media del índice de rendimiento multirespuesta para cada nivel de los parámetros de soldadura se resume y llevó a la tabla de índice de rendimiento multirespuesta (tabla 5).

Tabla 4. Resultados para el índice de rendimiento multirespuesta

Experimento	Índice de rendimiento multirespuesta
1	0.332
2	0.642
3	0.318
4	0.710
5	0.554
6	0.746
7	0.494
8	0.619

Tabla 5. Resultados para el índice de rendimiento multirespuesta

Símbolo	Parámetro de soldadura	Media MRPI		
		Nivel 1	Nivel 2	Max-Min
A	Corriente del arco	0.501	0.603	0.103
B	Voltaje del arco	0.569	0.535	0.033
C	Velocidad de la soldadura	0.522	0.582	0.060
D	Saliente del electrodo	0.425	0.679	0.255
E	Temperatura de pre-calentamiento	0.504	0.600	0.096

Por lo tanto, con base en la discusión anterior, los parámetros óptimos de soldadura son la corriente de arco en el nivel 2, el voltaje de arco en el nivel 1, la velocidad de soldadura en el nivel 2, el saliente de electrodo en el nivel 2, y la temperatura de precalentamiento en el nivel 2.

Las características de rendimiento, tales como la tasa de deposición y la dilución se consideraron y mejoraron a través de este método en lugar de utilizar los criterios de ingeniería simultánea.

Acarer et al [24] explica el efecto de las propiedades mecánicas de la calidad de la adhesión. Las pruebas de tracción cortante y ensayos de flexión mostraron que las muestras tratadas con calor tienen más fuerza que las que no fueron tratadas con calefacción. De acuerdo con los resultados de pruebas de tracción cortante, las interfaces de rectas y onduladas tenían fuerza similar. Aunado a lo anterior, las muestras no calentadas mostraron grietas en la zona de flexión después de ser sometidas a los ensayos de flexión.

En el trabajo llevado a cabo por Saurav et al [25] en la optimización de la geometría del cordón en la soldadura por arco sumergido sobre la placa utiliza el método de Taguchi. En el análisis relacional Grey, los datos experimentales, por ejemplo, medidas de las características de calidad se normalizaron primero de cero a uno. Este proceso se conoce como la generación relacional Grey. A continuación, sobre la base de datos experimentales normalizados, el coeficiente relacional Grey se calcula para representar la correlación entre los datos experimentales deseados y reales. Entonces el grado relacional Grey general se determina promediando el coeficiente relacional Grey correspondiente a las respuestas seleccionadas. La característica de rendimiento global del proceso de respuesta múltiple depende del grado de relación Grey calculado. Este enfoque convierte un problema de optimización de proceso de respuesta múltiple en una sola situación de optimización de la respuesta con la función objetivo del grado relacional Grey general. Se evalúa entonces la combinación óptima paramétrica que resultaría en el más alto grado de relación Grey. El factor de ajuste óptimo para maximizar el grado relacional Grey general se puede realizar por el método de Taguchi.

Tabla 6. Parámetros del proceso y sus límites.

Parámetro	Notación	Unidades	Niveles de los factores				
			1	2	3	4	5
Voltaje	V	volt	32	34	36	39	40
Velocidad de desplazamiento	Tr	cm/s	0.21	0.23	0.24	0.40	0.71
Saliente	N	mm	20	21	22	23	24
Velocidad de alimentación	Wf	cm/s	0.42	0.46	0.51	0.79	1.46
Velocidad de arrastre	Crf	cm/s	A	B	C	D	E

A fin de reducir los costos y el tiempo de experimentación y para buscar la condición óptima del proceso a través de un número limitado de experimentos, en el presente estudio se ha planeado utilizar cinco parámetros de proceso convencionales: voltaje, la velocidad de alimentación de alambre, velocidad de desplazamiento, saliente del electrodo y la velocidad de arrastre, estos parámetros se probaron en cinco niveles diferentes. La matriz ortogonal L_{25} de Taguchi ha sido seleccionada para restringir el número de corridas experimentales.

Tabla 7. Matriz ortogonal de Taguchi L₂₅

S1 No.	V	Tr	N	Wf	Crf
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4
7	2	2	3	4	5
8	2	3	4	5	1
9	2	4	5	1	2
10	2	5	1	2	3
11	3	1	3	5	2
12	3	2	4	1	3
13	3	3	5	2	4
14	3	4	1	3	5
15	3	5	2	4	1
16	4	1	4	2	5
17	4	2	5	3	1
18	4	3	1	4	2
19	4	4	2	5	3
20	4	5	3	1	4
21	5	1	5	4	3
22	5	2	1	5	4
23	5	3	2	1	5
24	5	4	3	2	1
25	5	5	4	3	2

Tabla 8. Resultados experimentales

Experimento	Ancho del cordón (mm)	Reforzamiento (mm)	Penetración (mm)	Profundidad del HAZ (mm)
1	9.246	2.383	1.114	1.735
2	10.592	3.342	1.554	1.373
3	11.323	2.93	1.502	1.709
4	13.441	2.875	2.046	1.196
5	13.726	1.994	2.305	2.9
6	14.373	3.988	1.373	5.05
7	20.025	3.993	1.914	4.241
8	19.98	3.501	2.408	3.108

9	8.496	1.657	1.243	0.647
10	7.381	1.503	1.347	0.388
11	27.5	5.309	3.116	5.902
12	10.929	2.592	1.295	1.813
13	11.811	3.056	1.139	4.558
14	13.133	3.134	2.512	2.227
15	11.499	2.149	2.02	1.968
16	2.019	3.414	2.033	4.244
17	11.784	2.772	0.984	1.942
18	16.809	2.771	1.916	6.54
19	17.871	3.568	2.2	3.948
20	9.401	1.502	0.57	0.622
21	17.247	3.47	2.098	5.116
22	18.753	3.233	3.185	2.919
23	17.482	3.289	2.143	4.036
24	9.738	1.658	1.554	1.269
25	6.501	1.167	0.647	1.243

La tabla de respuesta media para el grado de relación Grey general se muestra en la tabla 9, Para el diseño de experimentos ortogonal, es posible separar el efecto de cada parámetro de soldadura a diferentes niveles. Por ejemplo, la media del grado relacional Grey para la el voltaje en los niveles 1, 2, 3, 4 y 5 puede calcularse promediando los grados relacionales Grey para los experimentos 1-5, 6-10, 11-15, 16-20 y 21-25, respectivamente. La relación de grado relacional Grey medio para cada nivel de los otros parámetros se puede calcular de la manera similar.

Tabla 9. Respuesta (media) para el grado relacional Gris general.

Factor	Grado Relacional Grey				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
V	0.58394	0.56778	0.54624	0.55938	0.59132
Tr	0.51982	0.5499	0.50138	0.60636	0.6712
N	0.60062	0.51894	0.57138	0.60176	0.55596
Wf	0.6068	0.61396	0.56824	0.51838	0.54128
Crf	0.58276	0.58942	0.56598	0.5645	0.546

El ajuste óptimo de los factores se convierte en V1 Tr5 N4 WF2 CRF2. Las funciones objetivo se han seleccionado en relación con los parámetros conocidos del ancho del

cordón, reforzamiento, profundidad de penetración y la profundidad de la HAZ. La importancia de los factores en función de la producción total de la soldadura también se ha evaluado cuantitativamente por el método de análisis de la varianza (ANOVA).

Flood [26] discute métodos para soldar cobre con aluminio utilizando USW y describe el proceso y los parámetros que influyen en la resistencia de la soldadura. En este trabajo también aparece el uso de cobre para aplicaciones de soldadura de aluminio la industria eléctrica, electrónica y automotriz.

Jeng y Horng [27] han investigado los efectos de la carga aplicada, la rugosidad de la superficie, la energía de soldadura y el tiempo de soldadura en la fuerza de unión de las soldaduras por ultrasonido. Los experimentos revelaron que, una disminución de la carga o energía ultrasónica produce una amplia gama que puede ser soldada. Se encontró que la temperatura de contacto juega un papel importante en la resistencia de la unión en la fase inicial de la soldadura y la rugosidad de la superficie es el factor dominante en las etapas finales. La máxima fuerza de unión se produce en el período inicial para diferentes cargas y valores de rugosidad de superficie.

Hsiao et al [28] desarrolló un diseño de control difuso a través de redes neuronales (NN) con un enfoque basado en superar la influencia del error de modelado. En este enfoque, se utiliza el primer modelo de red neuronal para aproximar los subsistemas y luego la cada modelo NN se convierte por la dinámica de Inclusión Diferencial Lineal (LDI).

Tarng y Yang [29] describen una aplicación del método de Taguchi para la optimización de la geometría de cordón de soldadura en el proceso de soldadura por arco de tungsteno de gas. El valor de los parámetros de proceso de soldadura en los diferentes niveles se muestra en la tabla 10. Como se muestra en la Tabla 10, 8 grados de libertad están disponibles en los experimentos de soldadura.

Símbolo	Parámetro	Unidades	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
A	Apertura del arco	mm	2.4	3.2	
B	Relación de polarización	%	30	70	70
C	Velocidad de soldadura	cm min ⁻¹	24	35	46
D	Velocidad de relleno	mm min ⁻¹	1.5	2	2.5
E	Corriente de soldadura	A	80	95	110

Los grados de libertad para la matriz ortogonal deben ser mayor que, o al menos igual a los parámetros de proceso. En este estudio, se utilizó una matriz ortogonal L₁₈ con 8

columnas y 18 filas. Esta matriz tiene 17 grados de libertad y puede manejar un parámetro de proceso de dos niveles y siete parámetros de proceso de tres niveles. Cada parámetro del proceso de soldadura se asigna a una columna y están disponibles 18 combinaciones de parámetros de proceso de soldadura. Por lo tanto, sólo se requieren 18 experimentos para estudiar todo el espacio de parámetro del proceso de soldadura utilizando la matriz ortogonal L_{18} . Tres columnas de la matriz ortogonal están vacías porque de los parámetros del proceso de soldadura sólo cinco están asignados a la matriz ortogonal L_{18} . El diseño de experimentos para los parámetros del proceso de soldadura utilizando la matriz ortogonal se muestra en la Tabla 11. La Tabla 12 muestra los resultados de medición del cordón de soldadura basado en el diseño de experimentos.

Tabla 11. Diseño de experimentos usando una matriz ortogonal L_{18}

Experimento	Nivel de los parámetros de soldadura				
	A Apertura del arco	B Relación de polarización	C Velocidad de soldadura	D Velocidad de relleno	E Corriente de soldadura
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	1	2
5	1	2	2	2	3
6	1	2	3	3	1
7	1	2	1	2	1
8	1	2	2	3	2
9	1	2	3	1	3
10	2	1	1	3	3
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	2
13	2	2	1	2	3
14	2	2	2	3	1
15	2	2	3	1	2
16	2	2	1	3	2
17	2	2	2	1	3
18	2	2	3	2	1

Tabla 12. Resultados experimentales para la geometría del cordón de soldadura

Experimento	Altura frontal (mm)	Ancho frontal (mm)	Altura posterior (mm)	Ancho posterior (mm)
1	0.149	6.09	0.672	5.664
2	0.094	6.665	0.613	6.304
3	0.01	6.396	0.536	6.197
4	0.553	9.757	0.852	9.993
5	0.396	9.652	0.782	10.277
6	0.38	5.231	0.397	2.817
7	0.213	7.424	0.806	7.026
8	0.107	7.055	0.696	7.24
9	0.249	7.719	0.492	7.706
10	0.557	12.348	1.139	12.403
11	0.108	5.173	0.34	3.418
12	0.155	6,002	0.351	4.922
13	0.74	12.273	1.148	12.71
14	0.12	5.85	0.626	4.989
15	0.09	5,892	0.399	5.319
16	0.168	10.348	0.708	10.193
17	0.564	9.67	0.743	9.952
18	0.219	5.538	0.363	2.857

La Tabla 13 muestra los resultados experimentales para la relación multirespuesta señal-ruido (S/N). Puesto que el diseño experimental es ortogonal, es posible separar el efecto de cada parámetro del proceso de soldadura a diferentes niveles. Por ejemplo, la media de la relación de multirespuesta señal-ruido para la apertura del arco eléctrico en los niveles 1 y 2 puede calcularse promediando las multirespuesta relaciones de señal a ruido para los experimentos 1 a 9 y 10 a 18, respectivamente. La media de la relación de multirespuesta de señal a ruido para cada nivel de los otros parámetros del proceso de soldadura se puede calcular de una manera similar. La media de la relación multirespuesta de señal a ruido para cada nivel de los parámetros del proceso de soldadura se resume y se lleva a la tabla de multirespuesta de señal a ruido (Tabla 14). Además, la media total de la relación multirespuesta señal-ruido para los 8 experimentos también se calcula y se enumera en la Tabla 14.

Tabla 13. Relación de multirespuesta para el desempeño de la soldadura

Experimento	Relación de multirespuesta S/N (dB)
1	-3.497
2	-3.424
3	-2.700
4	-8.625
5	-7.643
6	-3.303
7	-5.334
8	-4.378
9	-4.679
10	-10.120
11	0.234
12	-1.520
13	-10.970
14	-2.746
15	-1.468
16	-6.671
17	-8.444
18	-1.140

Tabla 14. Respuesta señal a ruido para el desempeño de la soldadura

Símbolo	Parámetro	Media de la relación multirespuesta S/N (dB)			
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Max-Min
A	Apertura del arco	-4.842	-4.761		0.082
B	Relación de polarización	-3.505	-5.450		1.945
Crf	Velocidad de soldadura	-7.536	-4.400	-2.468	5.068
D	Velocidad de relleno	-4.413	-5.005	-4.987	0.592
E	Corriente de soldadura	-2.631	-4.348	-7.426	4.795

Basado en la relación señal-ruido y el análisis de la varianza, los parámetros óptimos para el proceso de soldadura son la abertura de arco en el nivel 2, la relación de polaridad en el nivel 1, la velocidad de soldadura en el nivel 3, la velocidad de relleno en el nivel 1, y la corriente de soldadura en el nivel 1. Se ha demostrado que el método de Taguchi proporciona una metodología sistemática y eficiente para la búsqueda de los parámetros del proceso de soldadura con la geometría óptima del cordón de soldadura. A través de ANOVA, se observa que la velocidad de soldadura, la razón de la corriente de la soldadura y la polaridad son los parámetros del proceso de soldadura

importantes para la determinación de la geometría del cordón de soldadura. Además, se llevaron a cabo los experimentos de confirmación para verificar los parámetros óptimos de proceso de soldadura.

Watanabe et al. [30] han investigado el efecto de las condiciones de soldadura sobre las propiedades mecánicas y micro estructura en la interface de la unión soldada entre la hoja de acero suave y la hoja de aleación de aluminio que contiene magnesio. De los resultados experimentales, los autores deducen que resistencia de la soldadura disminuye con el aumento de la fuerza de sujeción debido a que la fuerza de apriete excesiva reduce la acción de fricción en la interfaz.

Gaitonde et al. [31] han desarrollado los modelos matemáticos de segundo orden para la altura y el grosor de las rebabas usando el Método de Superficie de Respuesta (RSM) para minimizar el tamaño de rebabas en procesos de perforación. Utiliza los modelos RSM desarrollados en función de la aptitud en el GA y los parámetros del proceso de perforación se han optimizado.

Kansal et al. [32] han optimizado los parámetros del proceso de mezcla en polvo de mecanizado por electroerosión (PMEDM) mediante RSM. En el proceso de PMEDM, el RSM se ha utilizado para planificar y analizar los experimentos.

Oktem et al. [33] han desarrollado un modelo matemático para la rugosidad superficial en el proceso de mecanizado mediante RSM. A continuación, se utilizan los modelos RSM desarrollados como funciones de aptitud para optimizar los parámetros de corte: velocidad, alimentación, profundidad de corte axial, profundidad de corte radial, y la tolerancia de mecanizado de corte.

Onwubolua et al. [34] centrado en la maximización de ángulo de revestimiento en el revestimiento de polvo por láser. El autor desarrolló un modelo matemático para el ángulo de revestimiento mediante RSM en términos de altura y anchura de la cubierta revestida que es utilizado en la búsqueda de dispersión para optimizar los parámetros del proceso de revestimiento láser.

Suresh et al. [35] han desarrollado modelos matemáticos de segundo orden, en términos de los parámetros de mecanizado utilizando RSM. Los modelos de RSM desarrollados se utilizan como una función de aptitud para optimizar los parámetros de mecanizado. El método de Algoritmos Genéticos (GA) da valores mínimos y máximos de la rugosidad de la superficie y sus respectivas condiciones de mecanizado óptimas.

Alauddin et al. [36] han desarrollado modelos matemáticos para la vida de la herramienta en el fresado bajo condiciones extremadamente secas utilizando RSM en

términos de velocidad, alimentación, y la profundidad de corte y utilizan los modelos de RSM para averiguar las condiciones de corte óptimas para una vida de la herramienta necesaria.

Canyurt [37] estima que la resistencia de la soldadura de arco de tungsteno con gas pulsante de corriente de soldadura utilizando GA. El autor ha desarrollado Modelos de Algoritmos Genéticos de Estimación de la Fuerza de Soldadura (GAWSEM) para estimar la resistencia de la soldadura de materiales de latón. Los resultados indicaron que el modelo GAWSEM se puede utilizar como una técnica de estimación para predecir los parámetros de soldadura de latón que dan uniones de calidad.

Baboi y Grewell [38] estudiaron el efecto de intensificación de amplitud, eléctricamente controlado mediante el ajuste de la tensión suministrada al transductor, para la mejora de calidad de la soldadura. Se informó de que la intensificación de la amplitud aumentó resistencia de la soldadura e impidió que se pegaran la herramienta y las piezas de trabajo. También concluyeron que el control de la amplitud de soldadura durante el proceso de soldadura podría resultar en una mayor resistencia de la soldadura.

Tsujino et al. [39] desarrollaron sistema de soldadura por vibración compleja con un sonotrodo vibrando en trayectoria elíptica o circular. Mediante el uso de este sistema, demostraron que la resistencia de la soldadura de la unión entre los metales gruesos y disímiles se mejoró. Posteriormente Ueoka y Tsujino [39], aplicaron el sistema de vibración ultrasónica complejo para soldadura de costura de cobre - cobre, aluminio - aluminio, y cobre - aluminio, y las tres combinaciones fueron soldadas con resistencia de la soldadura casi igual a la resistencia de la muestra. Sin embargo, su trabajo sólo se centró en los aspectos de mejora de la calidad de la soldadura metalúrgica en el nivel local del proceso. Sólo hay una cantidad limitada de trabajo para abordar al nivel del sistema, es probable que ocurran problemas de resonancia en un conjunto de baterías con numerosas soldaduras.

Sooriyamoorthy et al. [40] aborda el problema que afronta la industria al tratar con proceso de soldadura de metal por ultrasonido: la pobre calidad de la soldadura y la resistencia de la soldadura debido a la selección incorrecta de los parámetros de soldadura. En este trabajo los parámetros de soldadura como la presión de soldadura, el tiempo de soldadura y la amplitud de la vibración se consideran para la elaboración de uniones soldadas por ultrasonidos de cobre, cuyo espesor es de 0,2 mm. Si se utilizan otros modos de unión, para láminas tan pequeñas, puede dañar la

soldadura. Un diseño experimental adecuado basado en la metodología de diseño robusto de Taguchi fue diseñado y ejecutado para la realización de ensayos. La presión de soldadura, el tiempo de soldadura y la amplitud de las oscilaciones fueron considerados como factores de control y analizados en tres niveles como se muestra en la tabla 15. Las tres interacciones que implican los factores de control, es decir, la interacción entre la presión de soldadura y tiempo de soldadura, la interacción entre el tiempo de soldadura y la amplitud de las oscilaciones y la interacción entre la presión de soldadura y la amplitud de las oscilaciones.

Tabla 15. Factores y sus niveles

S. No	Factor	Designación	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
1	Presión de soldadura (bar)	A	2.00	2.50	3.00
2	Tiempo de soldadura (s)	B	2.00	2.25	2.50
3	Amplitud (μm)	C	40	45	50

Teniendo en cuenta estos factores de control y sus interacciones, se encontró que la matriz ortogonal L_{27} era adecuada. Además, se considera que no hay factores de ruido. La matriz ortogonal L_{27} se muestra en la tabla 16 y contiene los resultados de 27 ensayos de diferentes combinaciones de factores con dos repeticiones por ensayo. Se calculó la relación señal-ruido para cada combinación de los parámetros de soldadura y se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados experimentales

S. No	Presión (bar)	Tiempo (s)	Amplitud (μm)	Prueba 1	Prueba 2	Fuerza promedio (10^6 N/m^2)	Relación señal a ruido
1	2	2	40	0.6	0.84	0.72	2.734
2	2	2	45	0.85	0.77	0.81	1.82
3	2	2	50	0.97	1.4	1.185	-1.615
4	2	2.25	40	0.92	1.26	1.09	-0.853
5	2	2.25	45	1.34	1.21	1.275	-2.121
6	2	2.25	50	1.41	1.42	1.415	-3.015
7	2	2.5	40	1.25	1.3	1.275	-2.112
8	2	2.5	45	1.14	1.35	1.245	-1.934
9	2	2.5	50	1.57	1.63	1.6	-4.084
10	2.5	2	40	0.62	0.88	0.75	2.37

11	2.5	2	45	0.75	0.8	0.775	2.209
12	2.5	2	50	0.9	0.89	0.895	0.963
13	2.5	2.25	40	0.92	1.3	1.11	-1.032
14	2.5	2.25	45	1.2	1.3	1.25	-1.945
15	2.5	2.25	50	1.51	1.41	1.46	-3.292
16	2.5	2.5	40	0.63	0.61	0.62	4.151
17	2.5	2.5	45	1.02	0.9	0.96	0.338
18	2.5	2.5	50	0.85	0.95	0.9	0.902
19	3	2	40	1.25	0.72	0.985	-0.172
20	3	2	45	0.9	1.06	0.98	0.147
21	3	2	50	1.03	0.7	0.865	1.104
22	3	2.25	40	1.23	1.04	1.135	-1.13
23	3	2.25	45	1.13	0.97	1.05	-0.449
24	3	2.25	50	0.98	0.98	0.98	0.175
25	3	2.5	40	1.25	1.15	1.2	-1.591
26	3	2.5	45	1.3	1.1	1.2	-1.614
27	3	2.5	50	0.87	0.93	0.9	0.91

El análisis de la varianza (ANOVA) y la señal de ruido a los análisis se emplean para investigar la influencia de diferentes parámetros de soldadura sobre la resistencia de la soldadura y para obtener los parámetros óptimos.

Tabla 17. Resultados ANOVA

Factor	DF	SS	MS	F Cal _{CALU}	F tab _{TABLE}	Inferencia	Contribución %
A	2	0.55356	0.27678	36.7	4.46	Significante	20
B	2	0.78883	0.39441	52.2	4.46	Significante	30
C	2	0.26036	0.13018	17.2	4.46	Significante	9
A×B	4	0.62808	0.15702	20.8	3.84	Significante	23
A×C	4	0.28548	0.07137	9.46	3.84	significante	10
B×C	4	0.02808	0.00702	0.93	3.84	Insignificante	----
Error	8	0.06034	0.00754				8
Total	26	2.60474					100

Los valores medios de resistencia para diferentes niveles de los parámetros seleccionados se muestran en las tablas 18. En la tabla 18, se deduce que cuando la presión está en el nivel 1 (2 bar), los valores promedio de resistencia de la unión son

más altas que la fuerza obtenida en el nivel de presión 2 (2,5 bar) y el nivel 3 (3 bar). Así, entre estos tres niveles de presión, nivel 1 es el mejor. Esto es de esperarse ya que al aumentar la presión, el sonotrodo sostiene las piezas de trabajo sin una cantidad significativa de frotamiento. En las líneas siguientes, el nivel 2 (2.25 s) para el tiempo de soldadura y el nivel 3 (50 μm) de amplitud se seleccionaron.

Tabla 18. Valores promedio de fuerza a diferentes niveles

Factores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Presión (bar)	1.179	0.969	1.033
Tiempo (s)	0.885	1.196	1.102
Amplitud(μm)	0.987	1.06	1.133

La combinación de factores que maximiza la resistencia de la soldadura es: presión (A) -2 bar, Tiempo de soldadura (B) - 2,25 s y la amplitud (C) -50 μm ; y la combinación de factores que minimiza la variación en la resistencia de la soldadura es: la presión (A) - 2,5 bar, Tiempo de soldadura (B) - 2,00 s y la amplitud (C) - 45 μm . Los factores que reducen al mínimo la variación y mejoran la uniformidad se consideran como la combinación óptima de parámetros óptima del proceso: presión (A) - 2,5 bar, Tiempo de soldadura (B) - 2,00 s y la amplitud (C) - 45 μm .

Capítulo 3. Procedimiento de investigación

Determinación de la capacidad del proceso.

Con el objetivo de comprobar que el equipo es capaz de producir piezas con una fuerza de desprendimiento constante a partir de parámetros definidos, se realizó el análisis de capacidad de proceso, para el análisis se evaluaron 50 muestras de acuerdo con el procedimiento para análisis de capacidad de proceso, definido por la empresa. El estándar de la industria automotriz indica que para que un proceso se considere capaz y en control el resultado mínimo del análisis de capacidad de proceso (Cpk) es 1.67. Para el análisis de los resultados se utilizó la opción: Capacidad de proceso Sixpack, del programa Minitab®. Los parámetros utilizados para el estudio de capacidad fueron:

- Energía: 1850 Ws
- Presión: 3.5 bar
- Amplitud: 85 %

El tiempo de soldadura promedio en el análisis de capacidad fue de 750ms.

Diseño de experimentos para fuerza de desprendimiento y tiempo de soldadura.

Mediante el diseño de experimentos se determinó el grado de influencia de cada parámetro del proceso: presión neumática aplicada al sonotrodo, porcentaje de la amplitud de oscilación nominal, energía aplicada en el proceso. El diseño de experimentos se realizó con un diseño factorial 2^3 con una repetición. Los factores del experimento son los parámetros que pueden ser ajustados en el equipo: presión, energía y amplitud.

El diseño de experimentos tiene dos respuestas: tiempo de soldadura y fuerza de desprendimiento. Para cada factor se definen 2 niveles que serán un valor inicial e incrementos del 30% en cada factor a partir del valor inicial. La matriz de prueba se muestra en la tabla 19. Para analizar los resultados se utilizó el programa Minitab®.

Tabla 19. Matriz de factores y niveles para el diseño de experimentos.

Experimento	Presión	Amplitud	Energía
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
7	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Tabla 20. Matriz de experimentos

Repetición	Presión	Amplitud	Energía	Fuerza	Tiempo
1	3	70	1000	508	542
1	3.9	70	1000	970	444
1	3	100	1000	422	435
1	3.9	100	1000	1216	345
1	3	70	1300	932	649
1	3.9	70	1300	722	540
1	3	100	1300	716	568
1	3.9	100	1300	1192	443
2	3	70	1000	468	546
2	3.9	70	1000	742	428
2	3	100	1000	536	434
2	3.9	100	1000	926	342
2	3	70	1300	850	685
2	3.9	70	1300	1004	535
2	3	100	1300	1554	559
2	3.9	100	1300	912	436

Análisis de regresión.

Una vez definida la variable a controlar en el proceso, se realizó el análisis de regresión para determinar de qué forma se relacionan la dicha variable y la salida del sistema.

Se realizó una corrida de 30 piezas partiendo de un valor inicial de 1000 Ws y con incrementos de 50 Ws de energía, los valores de presión y amplitud se mantuvieron constantes ya que en el diseño de experimentos se encontró que se deben mantener en el valor máximo, la presión se ajustó a 3.9 bar y la Amplitud al 100%.

Para el análisis de regresión se utilizó el análisis de regresión polinomial del programa Minitab®. En este punto no se analiza el tiempo de soldadura, solo se determina la relación entre la energía y la fuerza de desprendimiento.

Tabla 21. Datos utilizados para el análisis de regresión

Energía (Ws)	Fuerza
1000	1154
1050	1328
1100	1308
1150	1222
1200	1194
1250	1478
1300	1842
1350	1634
1400	1930
1450	1414
1500	1626
1550	1584
1600	1628
1650	1886
1700	1746
1750	1810
1800	1962
1850	1872
1900	1966
1950	2016
2000	1812
2050	2056
2100	2024
2150	2054
2200	1850
2250	1870
2300	1648
2350	2088
2400	1984
2450	1700
2500	1680

Las pruebas para determinar la fuerza de desprendimiento se realizan con un dinamómetro automático conocido como *Pull Tester*, dicho equipo tiene un rango de

10 a 10,000 Newton. Para realizar la prueba, se sujeta la terminal soldada a un extremo fijo del dinamómetro y el cable es sujetado por una mordaza que se desplaza hacia atrás en la dirección del eje del cable a una velocidad de 50 mm/min. El cable se estira hasta que se desprenda de la terminal y el valor medido por el dinamómetro es la fuerza de desprendimiento.



Figura 17. Equipo para prueba de desprendimiento

El valor del tiempo de soldadura se tomó directamente de la pantalla de la máquina.

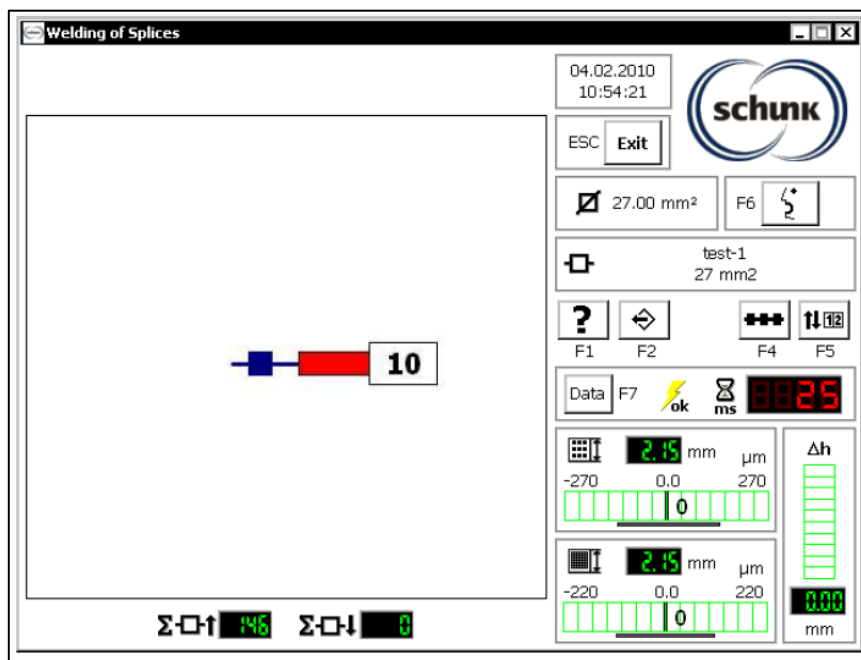


Figura 18. Pantalla del programa de la máquina de soldadura

Las especificaciones de los equipos y materiales usados están incluidas en los anexos.

Validación de los resultados.

Se realizó una corrida de prueba para validar el rango de ajuste determinado para la energía. Se probaron los límites superior e inferior.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Estudio de capacidad para el equipo de soldadura por ultrasonido.

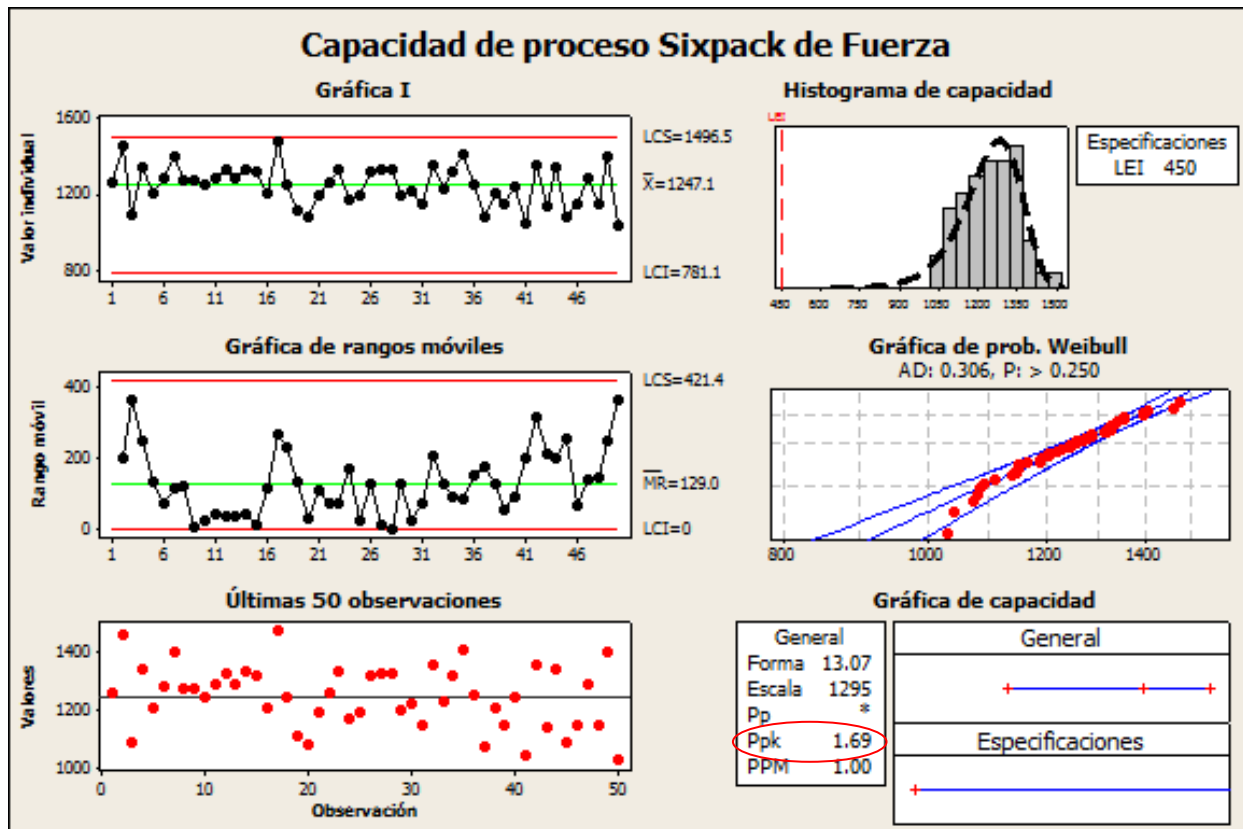


Figura 19. Análisis de capacidad para la fuerza de desprendimiento

El resultado del análisis de capacidad de proceso (Ppk) fue 1.69 y es mayor al mínimo requerido (1.67), las pruebas de normalidad se cumplen, lo que muestra que el equipo es capaz de producir resultados constantes.

4.2 Resultados del Diseño de experimentos para la respuesta Fuerza.

Se muestra la tabla 22 con los resultados del análisis de varianza para la fuerza de desprendimiento, en la figura 20 se indican los factores significativos para la fuerza de desprendimiento.

Tabla 22. Resultados del Análisis de varianza para la fuerza de desprendimiento.

Efectos y coeficientes estimados para Fuerza (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		854.4	63.05	13.55	0.000
A: Presión	212.2	106.1	63.05	1.68	0.131
B: Amplitud	159.7	79.9	63.05	1.27	0.241
C: Energía	261.7	130.9	63.05	2.08	0.072
A: Presión*B: Amplitud	42.3	21.1	63.05	0.34	0.746
A: Presión*C: Energía	-267.7	-133.9	63.05	-2.12	0.066
B: Amplitud*C: Energía	56.7	28.4	63.05	0.45	0.665
A: Presión*B: Amplitud*C: Energía	-69.7	-34.9	63.05	-0.55	0.595

S = 252.187 PRESS = 2035144
 R-cuad. = 63.43% R-cuad. (pred.) = 0.00% R-cuad. (ajustado) = 31.44%

Los factores que influyen en la fuerza de desprendimiento son: energía y la interacción de la presión con la energía.

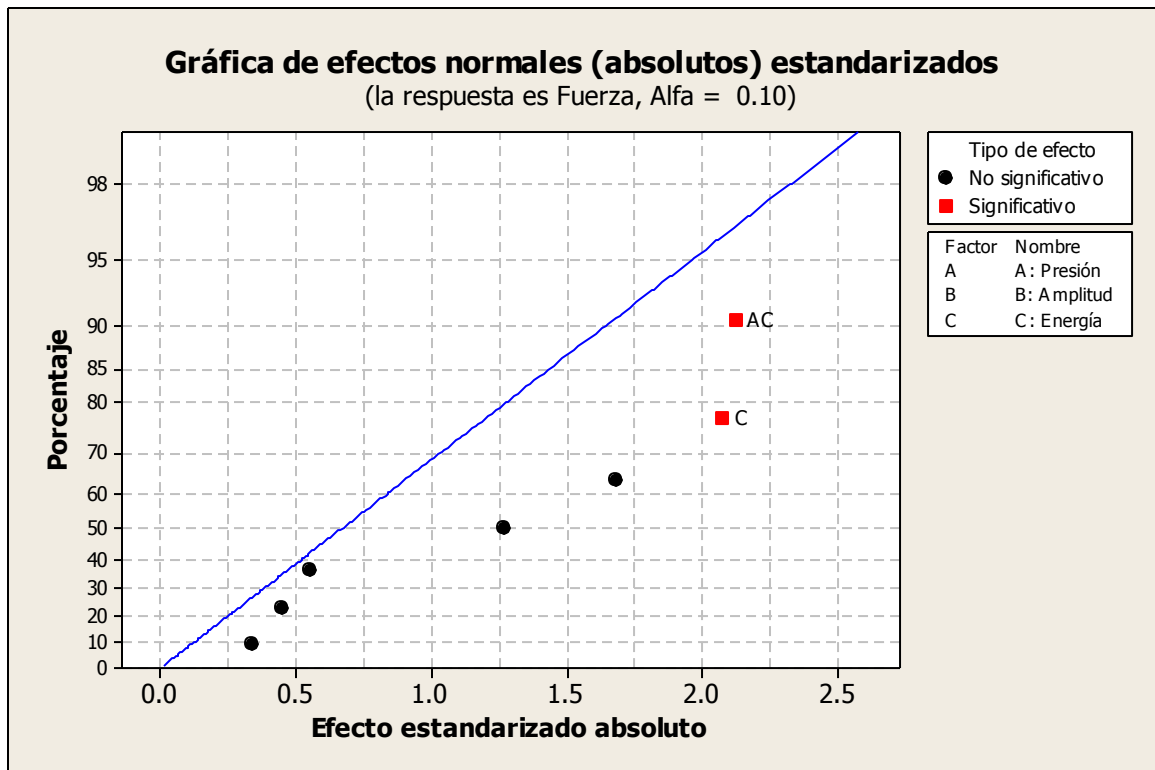


Figura 20. Gráfica de efectos normales estandarizados para la fuerza de desprendimiento

El 63.43% de la variación en el resultado está relacionada con los factores analizados y sus interacciones.

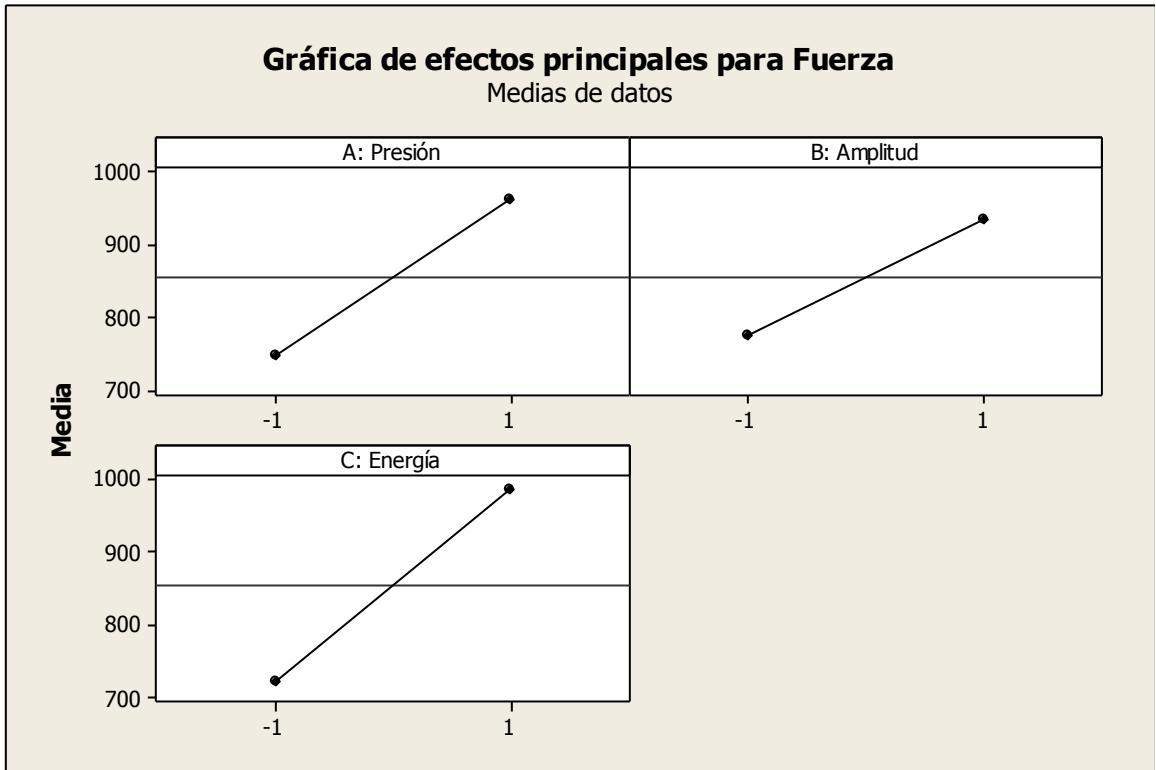


Figura 21. Gráfica de efectos principales para la fuerza de desprendimiento

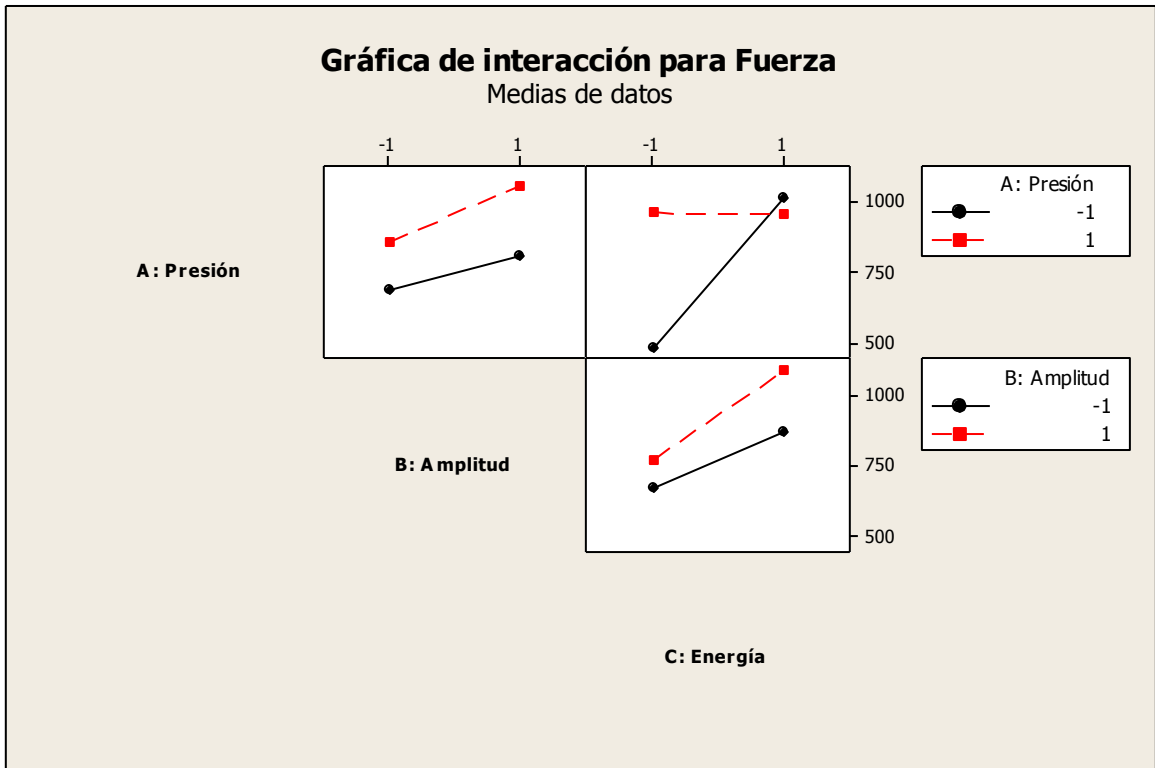


Figura 22. Gráfica de interacción de los factores para fuerza de desprendimiento.

Del diseño de experimento se observa que la fuerza de desprendimiento es directamente proporcional a la presión y la energía.

4.3 Resultados del Diseño de experimentos para la respuesta Tiempo

A continuación se presentan resultados del diseño de experimentos analizando la respuesta tiempo de soldadura, la tabla 23 muestra los resultados del análisis de varianza, las gráficas 24 y 25 corresponden a los efectos de cada factor y sus interacciones.

Tabla 23. Resultados del Análisis de varianza para el tiempo de soldadura.

Efectos y coeficientes estimados para Tiempo (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		495.69	2.602	190.51	0.000
A: Presión	-113.12	-56.56	2.602	-21.74	0.000
B: Amplitud	-100.87	-50.44	2.602	-19.39	0.000
C: Energía	112.37	56.19	2.602	21.60	0.000
A: Presión*B: Amplitud	5.62	2.81	2.602	1.08	0.311
A: Presión*C: Energía	-13.63	-6.81	2.602	-2.62	0.031
B: Amplitud*C: Energía	0.13	0.06	2.602	0.02	0.981
A: Presión*B: Amplitud*C: Energía	-2.88	-1.44	2.602	-0.55	0.596

S = 10.4073 PRESS = 3466
R-cuad. = 99.40% R-cuad. (pred.) = 97.60% R-cuad. (ajustado) = 98.87%

Los factores que influyen en la fuerza de desprendimiento son: energía, presión y amplitud. La interacción de la presión con la energía también influye en la respuesta.

El 99.40% de la variación en el resultado está relacionada con los factores analizados y sus interacciones.

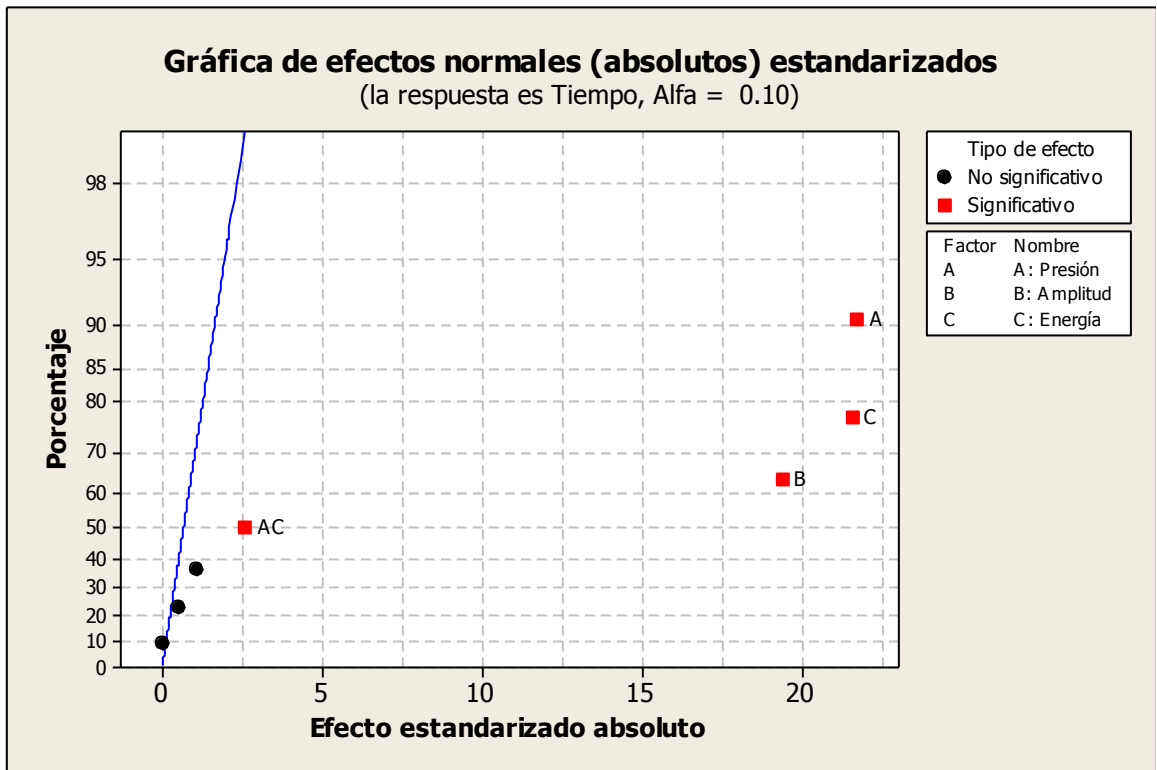


Figura 23. Gráfica de efectos normales estandarizados para el tiempo de soldadura.

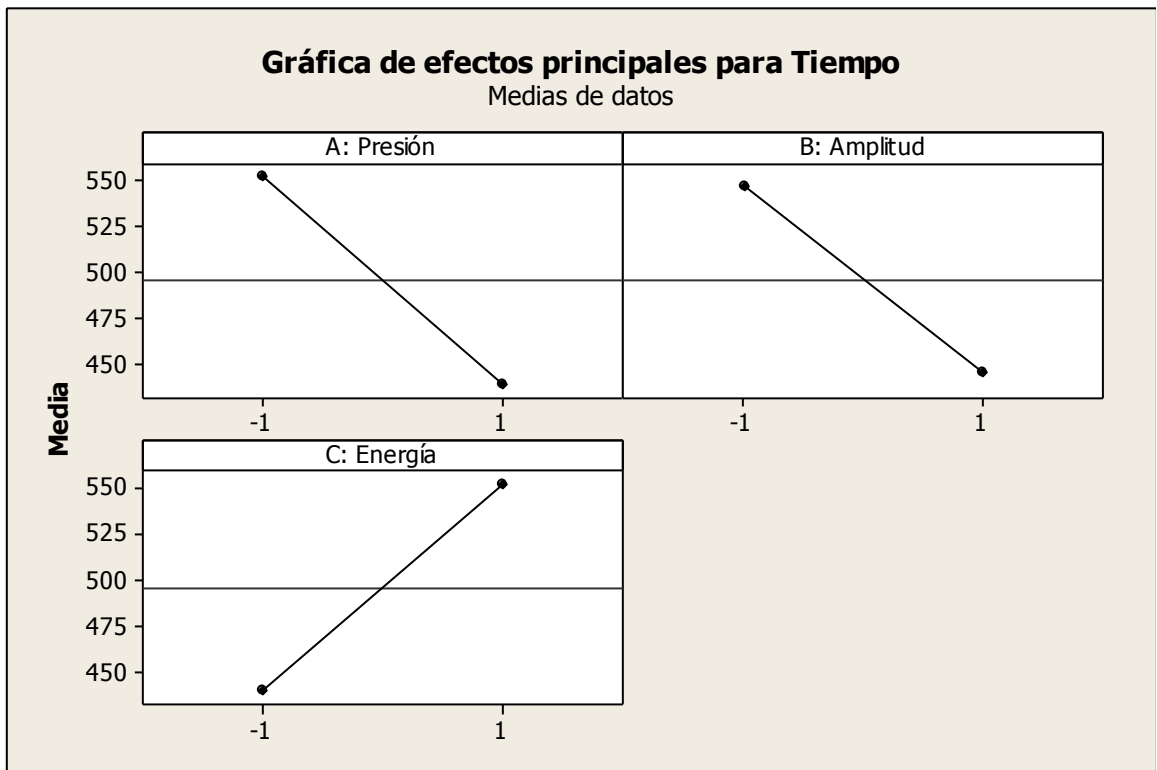


Figura 24. Gráfica de efectos principales para el tiempo de soldadura.

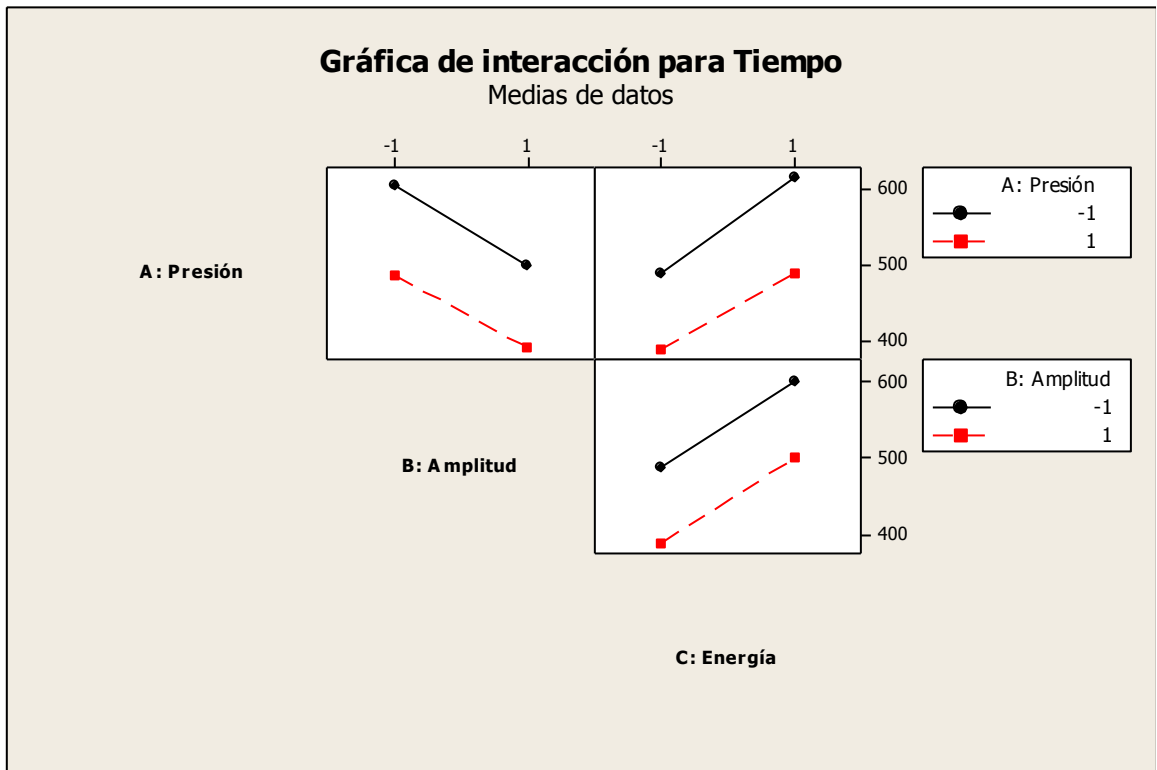


Figura 25. Gráfica de interacción de los factores para tiempo de soldadura.

En el diseño de experimentos se encontró que la amplitud y la presión son inversamente proporcionales al tiempo de soldadura y directamente proporcionales a la fuerza de desprendimiento, por lo tanto dichos factores se fijaron a su nivel alto para incrementar la fuerza de desprendimiento y disminuir el tiempo de soldadura:

- Presión: 3.9 bar
- Amplitud: 100 %

Para maximizar la fuerza de desprendimiento el nivel adecuado es el más alto, sin embargo, para minimizar el tiempo de soldadura, el nivel más adecuado es el más bajo.

Para determinar el valor de la energía que optimice la fuerza de desprendimiento y el tiempo de soldadura, se utilizó el análisis de regresión para determinar la relación entre la energía y la fuerza.

4.4 Grafica de regresión polinomial para Fuerza vs Energía

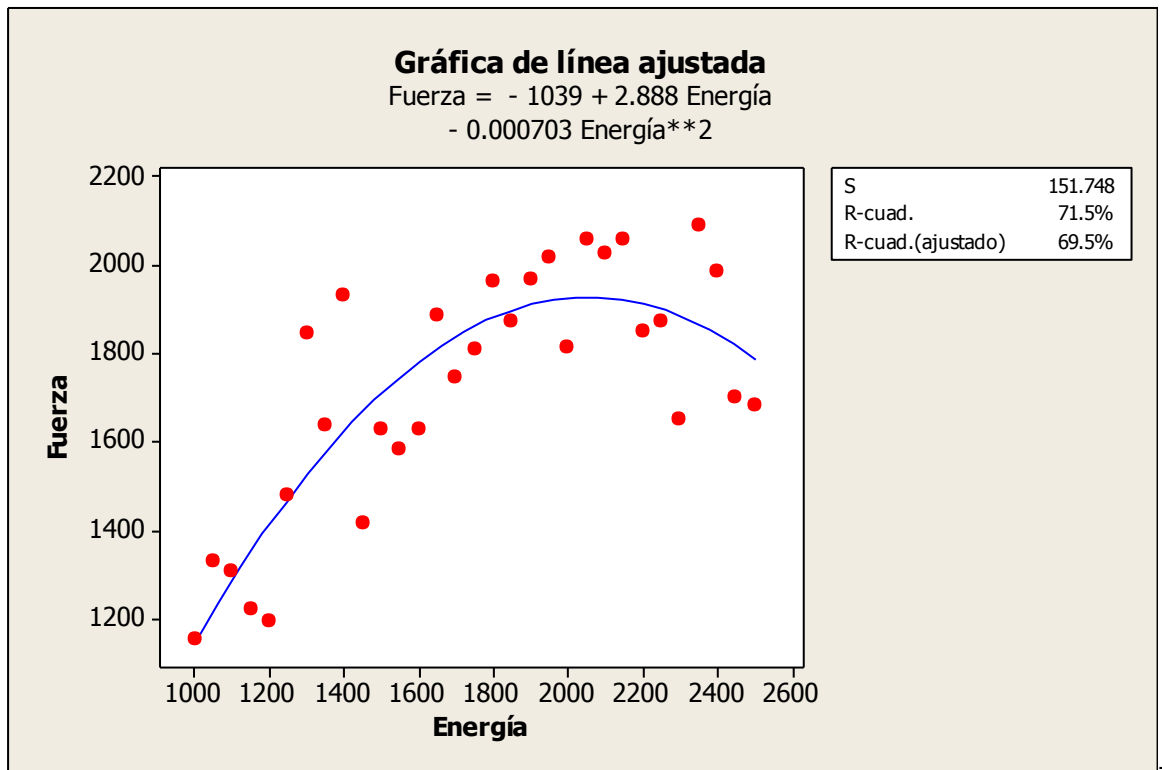


Figura 26. Grafica de línea ajustada para fuerza de desprendimiento.

Utilizando el software Minitab®, se realizó el análisis de regresión para determinar la relación entre la energía aplicada y la fuerza de desprendimiento, dando como resultado una ecuación de segundo grado:

$$F = -1039 + 2.88 E - 0.000703 E^2$$

Ecuación 17. Ecuación polinomial para la fuerza

Partiendo de esta ecuación es posible determinar el rango de ajuste que tendrá esta variable, para que la soldadura cumpla con los valores de fuerza de desprendimiento. Debido a que el valor mínimo requerido es de 1300 N y el error de regresión estándar (s) es de 151, se ajustaron los parámetros para que el resultado este entre 1500 y 1800 N y evitar que se puedan tener valores debajo de la especificación.

$$-0.000703 E^2 + 2.888 E - 1039 = 1500$$

$$E = 1274 \text{ Ws}$$

Ecuación 18. Fuerza mínima

$$-0.000703 E^2 + 2.888 E - 1039 = 1800$$

$$E = 1628 \text{ Ws}$$

Ecuación 19. Fuerza máxima.

El rango de ajuste para la energía se definió entre 1274 y 1628 Ws.

4.5 Validación en proceso.

En la tabla 24 y en la figura 27 se muestran los resultados de la corrida de validación para la fuerza de desprendimiento.

Tabla 24. Resultados de fuerza de desprendimiento de la corrida de validación.

	Valor mínimo (N)	Amplitud: 100%		Amplitud: 100%	
		Presión: 3.90 bar		Presión: 3.90 bar	
		Energía: 1274 Ws		Energía: 1628 Ws	
		Fuerza de desprendimiento medida (N)	Limite Inferior calculado (N)	Fuerza de desprendimiento medida (N)	Limite Superior calculado (N)
1	1300	1428	1500	1858	1800
2	1300	1604	1500	1754	1800
3	1300	1494	1500	1856	1800
4	1300	1452	1500	1860	1800
5	1300	1550	1500	1834	1800
6	1300	1596	1500	1838	1800
7	1300	1486	1500	1886	1800
8	1300	1466	1500	1786	1800
9	1300	1558	1500	1856	1800
10	1300	1578	1500	1864	1800
11	1300	1590	1500	1876	1800
12	1300	1436	1500	1756	1800
13	1300	1610	1500	1834	1800
14	1300	1438	1500	1822	1800
15	1300	1566	1500	1702	1800
16	1300	1576	1500	1702	1800
17	1300	1444	1500	1708	1800
18	1300	1544	1500	1816	1800
19	1300	1610	1500	1814	1800
20	1300	1484	1500	1760	1800

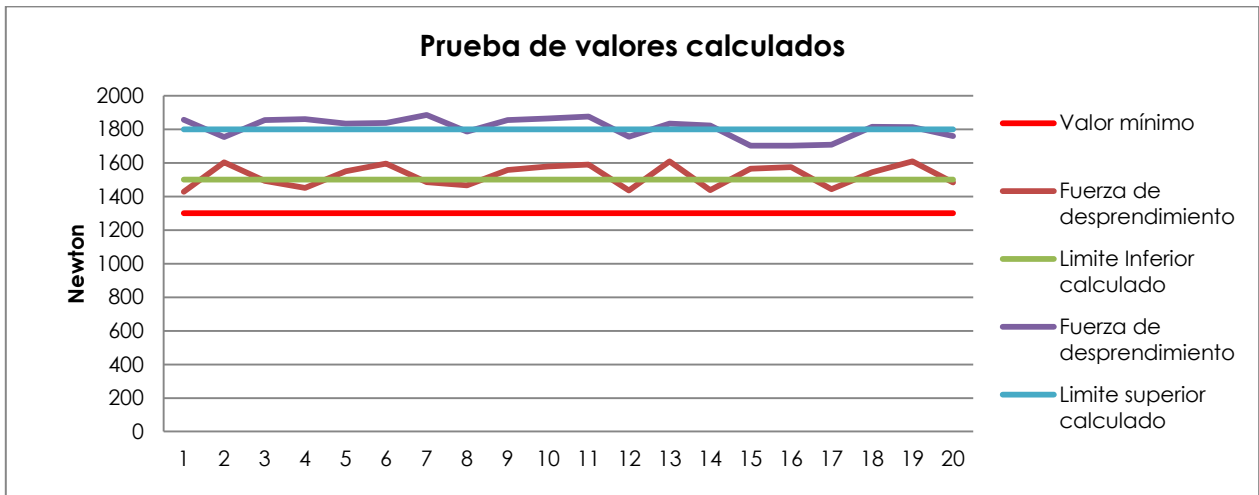


Figura 27. Comparación entre los valores calculados y los valores obtenidos.

Los resultados de la validación coinciden con los valores pronosticados por la ecuación que relaciona la energía con la fuerza de desprendimiento.

Los tiempos obtenidos en la corrida de validación se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Resultados de tiempo de soldadura de la corrida de validación.

	Amplitud: 100%	Amplitud: 100%
	Presión: 3.90 bar	Presión: 3.90 bar
	Energía: 1274 Ws	Energía: 1628 Ws
	Tiempo de soldadura (ms)	Tiempo de soldadura (ms)
1	449	594
2	480	553
3	474	580
4	482	571
5	484	569
6	480	548
7	476	567
8	457	580
9	465	577
10	480	576
11	485	576
12	476	575
13	480	562
14	474	581
15	466	561
16	483	554
17	467	575
18	461	577
19	478	585
20	491	567

4.6 Tiempo de soldadura

El tiempo de soldadura depende de la energía aplicada, entre mayor sea la energía el tiempo de soldadura será más grande. Por lo tanto, al ajustar el valor de energía dentro de un rango que asegure la fuerza de desprendimiento y que no se aplicara más energía de la requerida, el tiempo de soldadura será menor.

El tiempo de soldadura promedio que se tenía antes de la definición de los parámetros era de 750 ms, este tiempo se obtuvo en el análisis de capacidad de proceso con los parámetros que se utilizaban antes de realizar el estudio.

El tiempo de soldadura promedio en la corrida de validación fue de 520 ms.

El tiempo de soldadura se redujo en 30%.

CONCLUSIONES

Este trabajo está enfocado a la productividad y eficiencia de la industria de manufactura y tiene como base la reducción de los parámetros de ajuste y el tiempo de proceso.

El equipo utilizado es capaz de producir resultados constantes sin que el operador del equipo influya en el resultado.

Los tres parámetros que se pueden ajustar en el proceso, afectan la fuerza de desprendimiento y el tiempo de soldadura. La presión y la amplitud se deben ajustar al nivel más alto para reducir el tiempo de soldadura e incrementar la fuerza de desprendimiento.

La ecuación de la fuerza de desprendimiento generada, permite predecir la fuerza de desprendimiento en función de la energía aplicada; y permite definir un rango de ajuste que maximiza la fuerza de desprendimiento y minimiza la energía.

Utilizando la ecuación que se obtiene en el análisis de regresión, el tiempo de soldadura reduce en 30% y la fuerza de desprendimiento se encuentra por encima de los 1500 N y no excede de 1800 N.

La determinación estadística de los parámetros simplifica el proceso de ajuste del equipo de soldadura y permite reducir el tiempo y la energía en el proceso, dando como resultado un incremento de la eficiencia del proceso asegurando, también, el cumplimiento de la fuerza de desprendimiento.

RECOMENDACIONES

Los parámetros y rangos de ajuste definidos en este estudio deben ser integrados en el procedimiento de ajuste de la máquina para ser utilizados por los operadores en la puesta a punto del equipo.

Se debe seguir el procedimiento descrito en el capítulo tres, con todas las combinaciones de terminal y calibre del cable, que se lleguen a utilizar en el proceso de producción.

El desempeño del proceso debe ser monitoreado por medio del análisis estadístico del proceso.

La frecuencia de oscilación es un valor que se mantuvo constante durante el estudio por dos razones: el equipo no es capaz de operar a otra frecuencia y es un requerimiento del cliente, sin embargo, la frecuencia de las vibraciones influye notablemente en los resultados y se debe explorar esta opción.

En este estudio se trabajó con la unión de terminales y cables de cobre, es necesario determinar si esta metodología puede ser aplicada a la unión de terminales de cobre con cables de aluminio, ya que cada vez son más las aplicaciones de cable de aluminio dentro de la industria automotriz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RAJAGOPAL K. Text Book of Engineering Physics – Part I, New Delhi, PHI Learning Private Limited, 2008. 1-31 p.
- [2] GREWELL D.; BENART A.; PARK L.A. Plastics and Composites welding Handbook, Cincinnati: Hanser Gardner, 2003. 141-188 p.
- [3] CZERNY B.; KHATIBI G.; WEISS B.; Licht T. A fast test technique for life time estimation of ultrasonically welded Cu–Cu interconnects. *Microelectronics Reliability*, 2010, No 50. 1641–1644 p.
- [4] MARIKANI A. Engineering Physics, New Delhi: PHI Learning Private Ltd., 2009. 1-32 p.
- [5] ELIZONDO F.; LARA C.; CUPICH J. Soldadura Ultrasónica. *Ingenierías*, Julio-Septiembre 2002, Vol. V, No. 16.
- [6] ZHANG C.; LI L.; A Finite Element Based Study of Dynamic Processes in Ultrasonic Welding, *Trends in Welding Research International Conference*, 2009. 254-257 p.
- [7] EDMONS P. *Methods of Experimental Physics*, Volume 19 Ultrasonics, New York: Academic Press Inc., 1981. 29-61, 348-350 p.
- [8] ANDERSON M.J. Trimming the Fat out of Experimental Methods. *OE Magazine*, 2005, Vol 5, No 6, p. 32-33
- [9] FISHER R.A. *The design of Experiments*. New York: Wiley, 1955.
- [10] BOX G.E.P.; WILSON K.B. On the experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1951. Series B, No 13, p. 1-45
- [11] TANCO M.; VILES E.; POZUETA L. Comparing different approaches for Design of Experiments (DOE). *Advances in Electrical Engineering and Computational Science*, 2009, p 611-622.
- [12] Deming W. E.; *Calidad, Productividad y Competitividad*, Madrid: Díaz Santos, S. A., 1989.
- [13] MONTGOMERY D.C. *Design and analysis of experiments*, 6 ed. New York: Wiley, 2005.
- [14] BOOKER B.W.; LYTH D.M. Quality Engineering from 1998 through 2005: Lessons from the past and trends for the future. *Quality Engineering*, 2006. Vol. 18 No 1, p. 1-4.
- [15] GOH T.N. Taguchi Methods: Some technical, Cultural and Pedagogical perspectives. *Quality and Reliability Engineering International*, 1993. Vol. 9, No 3, p. 185-202

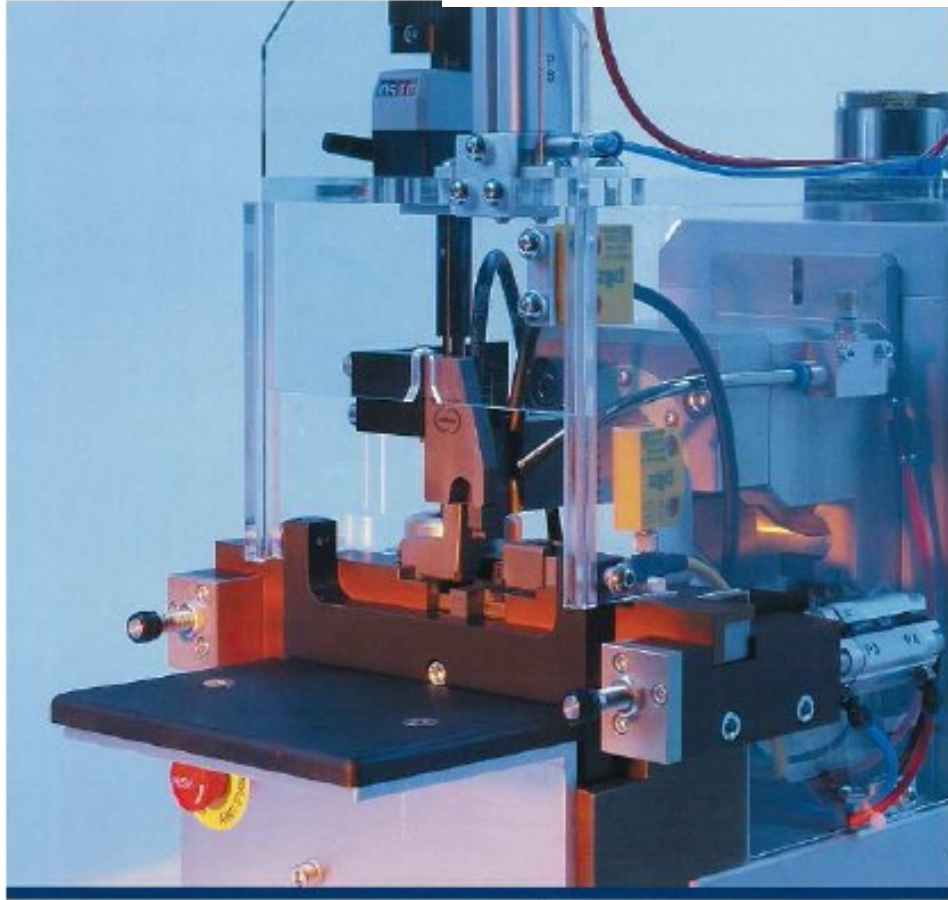
- [16] ARVIDSSON M.; GREMYR I. Principles of Robust Design Methodology. Quality and Reliability Engineering International, 2008. Vol. 24, No 1, p. 23-35
- [17] ROBINSON, T.J.; BORROR C.M.; MYERS R.H. Robust Parameter Design: A review. Quality and Reliability Engineering International, 2004. Vol. 20, No 1, p. 81-101
- [18] SHAININ D.; SHAININ P. Better than Taguchi's Orthogonal Tables. Quality and Reliability Engineering International, 1998. Vol 4, No 2, p. 143-149
- [19] BHOTE K.R.; BHOTE A.K. World Class Quality. Using Design of Experiments to make it happen. New York: Amacom, 2000.
- [20] TAGUCHI G.; CHOWDHURY S.; WU, Y. Taguchi's Quality Engineering Handbook. New York: Wiley-Interscience: 1996.
- [21] CHAPRA S.C.; CANALE R.P. Métodos numéricos para ingenieros 5 ed. México: Mc. Graw Hill, 2006. p. 466-498
- [22] LI J.; TAN J.; LEI H., JUE Z. The Characteristics of Ultrasonic Vibration Transmission and Coupling in Bonding Technology. IEEE Proceeding of HDP, 2004, p. 7803-8620
- [23] TARNG Y.S.; YANG; JUANG S.C. The use of fuzzy logic in the Taguchi method for the optimization of the submerged arc welding process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, No 16, p. 688–694
- [24] ACARER M.; ULENC B.G.; FINDIK F. The influence of some factors on steel/steel bonding quality on their characteristics of explosive welding joints. Journal of Materials Science, 2004, No 39, p. 6457–6466.
- [25] DATTA S.; BANDYOPADHYAY A.; PAL P.K. Grey-based Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead on-plate welding. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, No 39, p. 1136–1143.
- [26] FLOOD G. Ultrasonic energy welds copper to aluminum. Welding Journal, 1997, No 76, p. 43–45
- [27] JENG Y.R.; HORNG J.H. A micro contact approach for ultrasonic wire bonding in microelectronics. Journal of Tribology, 2001, No 123, p. 725–731.
- [28] HSIAO F.H.; XU S.D.; LIN C.Y.; TSAI Z.R. Robustness Design of Fuzzy Control for Nonlinear Multiple Time-Delay Large-Scale Systems via Neural-Network-Based Approach. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics, 2008, No 38:244–251
- [29] TARNG Y.S.; YANG W.H. Optimization of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, No 14, p. 549–554

- [30] WATANABE T.; SAKUYAMA H.; YANAGISAWA A. Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, No 34, p. 1107–1111
- [31] GAITONDE V.N.; KARNIK S.R.; ACHYUTHA B.T.; SIDDESWARAPPA B. Genetic algorithm-based burr size minimization in drilling of AISI 316 L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, No. 197, p. 225–236
- [32] KANSAL H.K.; SINGH S.; KUMAR P. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005 No 169, p. 427–436
- [33] OKTEM H.; ERZURUMLU T.; KURTARAN H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, No 170, p. 11–16
- [34] ONWUBOLUA G.C.; PAULO DAVIMB J.; OLIVEIRAC C.; CARDOSOB A. Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search. *Journal of Optical Technology*, 2007, No 39, p. 1130–1134
- [34] SURESH P.S.; VENKATESWARA RAO P.; DESHMUKH S.G. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, No 42, p. 675–680
- [35] ALAUDDIN M.; EL BARADIEB M.A.; HASHMI M.S. Prediction of tool life in end milling y response surface methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, No 71, p. 456–465
- [36] CHOUDHURY I.A.; ELBARADIEB M.A. Machinability assessment of inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, No 95, p. 30–39
- [37] BABOI M.; GREWELL D. Evaluation of amplitude stepping in ultrasonic welding. *Welding Journal*, 2010, Vol. 89, No 8, p. 56-61
- [38]. TSUJINO J.; UEOKA T.; KONDA H.; KIMURA Y. Ultrasonic welding of thin metal plates using a complex vibration welding tip. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992 No 31, p. 287–289
- [39] UEOKA T.; TSUJINO J. Welding characteristics of aluminum and copper plate specimens welded by a 19 kHz complex vibration ultrasonic seam welding system. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, No 41, p. 3237

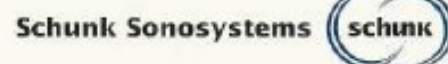
[40] SOORIYAMOORTHY E.; PRAKASAN K.; V. JAIGANESH. Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, No 51, p 163–171

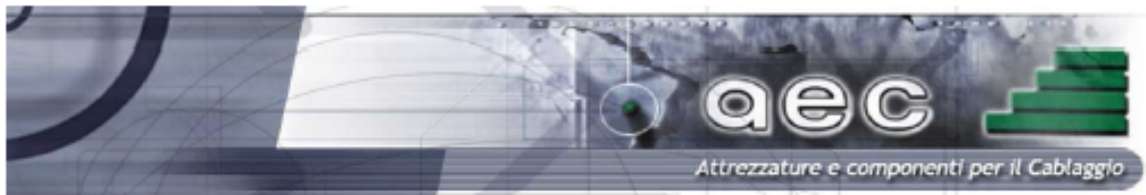
ANEXO A

Especificaciones de la máquina de soldadura por ultrasonido



Schunk Ultrasonic Welding Systems DS-20



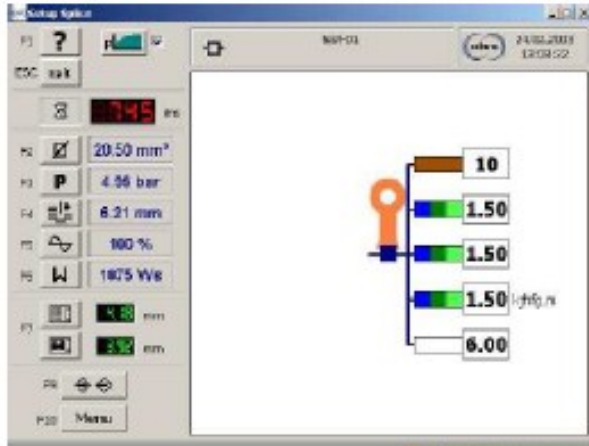


Schunk DS20 Special - GT –

Ultrasonic Welding Machine designed for Ground Terminals

Technical data

HF Generator Power :	3 kW
Frequency :	20 kHz
Sonotrode :	Single or Double sized (with different dimensions 5 and 7 mm) .
Optional :	Manual quick change revolving with n. 2 positions possibilities. Un-lock feature without opening the machine cover . Easy side jaws set-up with n. 2 mechanical stops.
Anvil system	Anvil for both different ground terminals
Side bridge	Side wire compaction with position regulation and terminal width control by sensors
Stroke limiting	A fine pitch adjusting screw with scale fix the mechanical stop into segments of 0.1 mm. Max stroke distance is 25mm.
Insulation crimper	Insulation barrels forming with accurate regulation during the welding process
Quality control	Quality Monitor Unit Inspector II
Operator Unit	Hand terminal with foil covered keyboard for manual entry of welding parameters
Mounting	Cabinet with wheels and Monitor and keyboard support
PC integration	PC with Windows based software for all machine parameters set up, and QC systems handling checking compacting height, welding height and controls the constant welding energy. In case that the pre-selected compacting height is not reached, "Inspector II" gives a signal and the machine does not start the welding process. Safety and noise protection as per "CE" normes.



ANEXO B

Especificaciones del cable

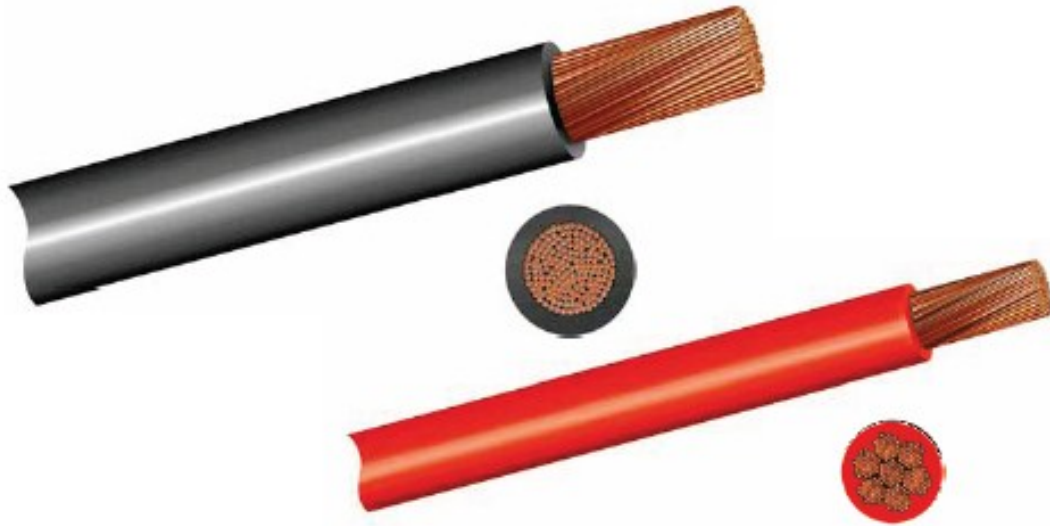
Batterie

Batterieleitungen

mit normalwandiger Isolationswandstärke
und Kupferleiter

Battery cables

with regular wall thickness
and copper conductor



Leitungsbeschreibung

Beschreibung: Batterieleitung

Leiter:
Elektrolytkupfer Cu-ETP1 gemäß DIN EN 13602
blank oder verzinkt

Isolation:
PVC, PUR, TPE-S je nach Typ und Anwendung

Liefergebilde:
Sperrholzspulen, Kunststoffspulen, Holztrommeln

Norm: LV 112-1

Cable description

Description: Battery Cables

Conductor:
Electrolyte copper Cu-ETP1 according to DIN EN 13602
bare or tinned

Insulation:
PVC, PUR, TPE-S depending on type and application

Forms of supply:
plywood spools, plastic spools, wooden drums

Standard: LV 112-1

Battery

Kurzzeichen / Code

FLY	/T85
FLYKW	/T105
FLYW	/T110
FL11Y	/T110
FL11Y	/T125
FL31Y	/T125

Technische Daten / Technical data

Quer- schnitt cross section	Einzeldraht single wire		Leiter conductor		Leitung cable			Gewicht ¹ weight ¹
	Anzahl ² number ²	Ø max. diameter max.	Widerstand blank max. resistance bare max.	Widerstand verzinkt max. resistance tinned max.	Außen-Ø max. outer diameter max.	Zulässige Abweichung permissible deviation	Wandstärke der Isolierung min. wall thickness min.	
[mm ²]	-	[mm]	[mΩ/m]	[mΩ/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/m]
10	80	0,41	1,82	1,85	6,5	-0,5	0,80	122
12	96	0,41	1,52	1,60	7,1	-0,5	0,80	143
16	126	0,41	1,16	1,18	7,5	-0,6	0,80	182
20	153	0,41	0,96	1,00	8,4	-0,7	0,88	221
25	196	0,41	0,743	0,757	9,6	-0,8	1,04	287
30	225	0,41	0,647	0,684	10,1	-0,8	1,04	325
35	276	0,41	0,527	0,538	10,9	-0,8	1,04	392
40	308	0,41	0,473	0,500	11,5	-0,8	1,12	438
50	396	0,41	0,368	0,375	12,8	-0,9	1,20	558
60	463	0,41	0,315	0,333	13,7	-0,9	1,20	644
70	360	0,51	0,269	0,264	14,6	-0,9	1,20	778
85	418	0,51	0,225	0,228	16,6	-1,0	1,28	895
95	475	0,51	0,196	0,200	17,0	-1,0	1,28	1017
120	608	0,51	0,153	0,156	18,3	-1,2	1,28	1284
160	400	0,71	0,120	-	21,4	-1,3	1,28	1618

¹ Gewicht mustergerecht, Tabellenwerte gelten für PVC.

² Abweichungen bei ≤ 50 Einzeldrähte: ± 1 Draht, bei > 50 Einzeldrähten ± 5% bei Einhaltung des elektrischen Widerstands und des max. Einzeldrahtdurchmessers sind zulässig.

¹ Weights according to sample, values are valid for PVC.

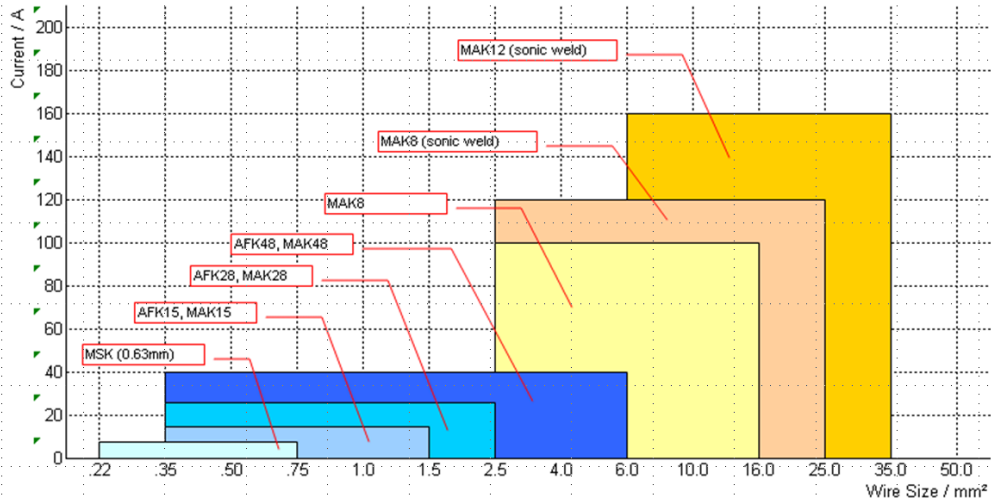
² Deviations of the number of single wires are allowed: for ≤ 50 wires: ± 1 wire, for > 50 wires: ± 5% by observance of the electric resistance and the max. single wire diameter.

ANEXO C


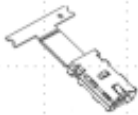


Especificaciones técnicas de la terminal MAK

Power Terminals Application Range

Terminal Overview - Current and Wire Size Application

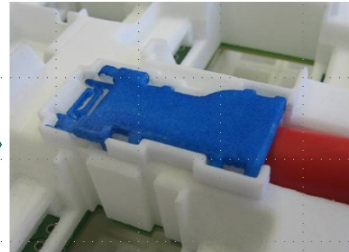
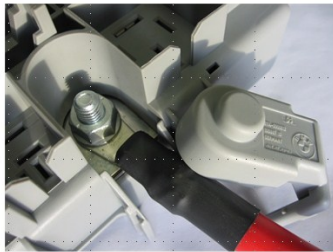
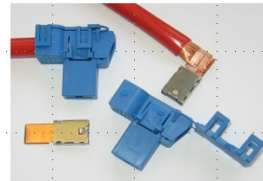


Product Line-Up

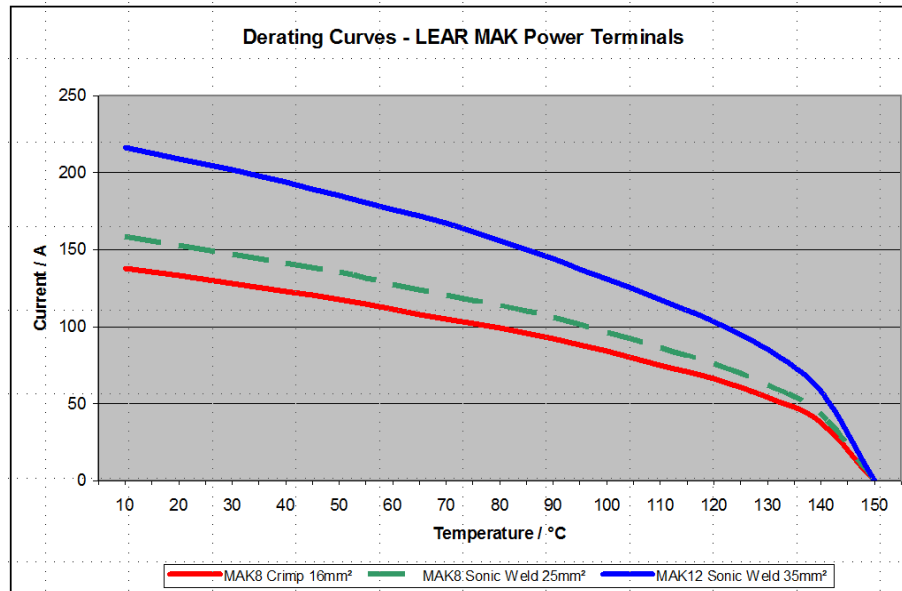
	Female Terminal	Male Terminal
MAK8 Crimp		Product currently not available
MAK8 Sonic Weld		Product currently not available Can be installed short term
MAK12 Crimp	None, product not planned	None, product not planned
MAK12 Sonic Weld		

MAK12 Application Example

- Power supply to central junction box
 - replaced eyelet terminal with direction connection
 - elimination of bolt and nut → weight saving
 - elimination of screwing operation → process improvement
 - elimination of screwing operation → deletion of power tools from assembly line
 - optimised wire routing → package space improvement



Terminal Electrical Performance



all parts with Ag surface finish and maximum applicable wire size
 * MAK8 Sonic Weld, preliminary derating, from prototype parts

Terminal Performance Summary

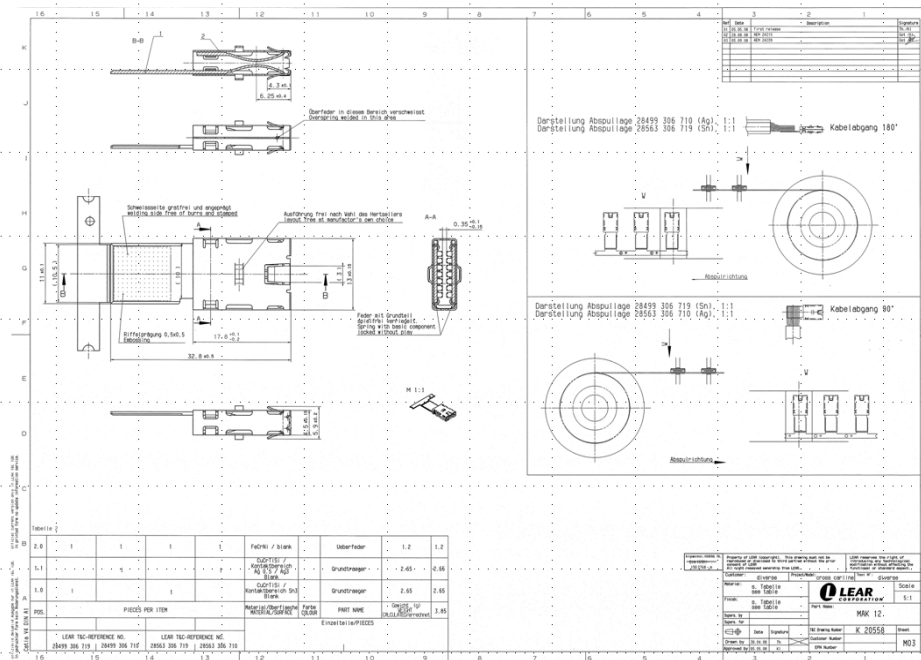
Lear Power Terminals, Performance Summary

	MAK8 Crimp	MAK8 Sonic Weld	MAK12 Sonic Weld
Applicable Wire Size	2.5 - 16.0mm ²	2.5 - 25.0mm ²	6.0 - 35.0mm ²
Contact Resistance	< 1mOhm	< 1mOhm	< 1mOhm
Maximum Rating	120A @ 80°C, 16mm ² , Ag finish	130A @ 80°C, 25mm ² , Ag finish	190A @ 80°C, 35mm ² , Ag finish
Derating	100A @ 80°C, 16mm ² , Ag finish	110A @ 80°C, 25mm ² , Ag finish	160A @ 80°C, 35mm ² , Ag finish
Operating Temperature	-40°C ... +130°C, Sn finish	-40°C ... +130°C, Sn finish	-40°C ... +130°C, Sn finish
	-40°C ... +150°C, Ag finish	-40°C ... +150°C, Ag finish	-40°C ... +150°C, Ag finish
Terminal Mating Effort	< 25N on first insertion	< 25N on first insertion	< 40N on first insertion
	< 20N on second insertion	< 20N on second insertion	< 35N on second insertion
Mating Cycles	10 for Sn finish	10 for Sn finish	10 for Sn finish
	50 for Ag finish	50 for Ag finish	50 for Ag finish
Terminal Retention to Housing	> 120N	> 120N	> 120N

derating preliminary, taken from prototype parts

- Outstanding electrical performance and mechanical robustness
- Sonic weld version offers additional harness routing flexibility

Terminal Drawings: MAK12 Sonic Weld



ANEXO D

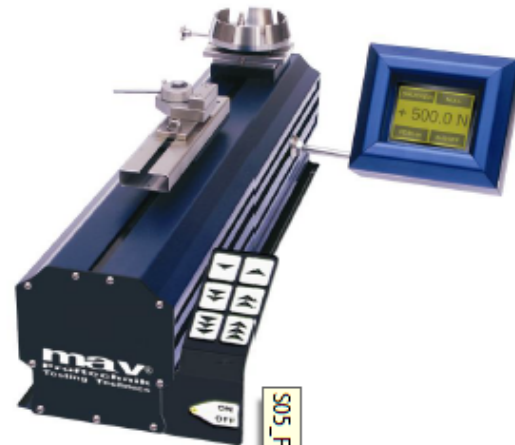
**Especificaciones del equipo utilizado para realizar
la prueba de desprendimiento**

Motorized Digital Tester Model FTM

- Indication Ranges 0-50 N, 0-100 N, 0-250 N, 0-500 N, 0-1000 N, 0-2000 N, 0-5000 N, 0-10000 N
- Motor Driven with constant Testing Speed

Basic Information:

- Digital testing device for tensile and compressive force measurements.
- Tester with motorized drive unit for precise and dependable measurements in test laboratories, production lines and quality assurance inspections.
- Suitable for testing ready-made supply cables, plugs, components and ceramic work-pieces and also for tensile and compressive force tests in the field of material testing.
- Easy to use, space-saving testing device.
- Readout and operation via resistant touchscreen with dot matrix-LCD-Display.
- Linear guidance protected against dust.
- High internal measurement frequency and high resolution, ensuring the optimal measurement
- Tare-compensation.
- Set point specification.
- 2 Operating modes:
 - Peak-mode, displaying the highest measured force value of the entire measurement procedure.
 - Tracking-mode, displaying the current force value.
- Memory space for measured values.
- Setup menu for parameter setting and adjustment.
- Serial interface for data output.
- Overload indicator.
- Overload protection of load cells: 200% to 2000% of nominal load, depending on section.
- Thermal overload protection.
- Shielding of force transducer and AD-converter against electromagnetic radiation (mobile phone interference etc.).
- Tough drive unit.
- FTM Tester with 3 constant testing speeds:
 - between 5 and 600 mm/min up to 2.000 N nominal load;
 - between 5 and 300 mm/min up to 5000/10000 N nominal load
- Durable and maintenance free metal construction
- Universal quick action clamps for tool fixture
- Interface for PC-Software mavSTATuight and mavDataEX.



FTM 50 with SG 40 and MK 8/A
 FTM 1000 with SG 90 and SHA 40



Model Overview FTM

Code	Indication Range [N]	Resolution [N]
5	0- 50	0.01
10	0- 100	0.02
25	0- 250	0.05
50	0- 500	0.1
100	0- 1000	0.2
200	0- 2000	0.5
500	0- 5000	1
1000	0- 10000	2

Clamping Tools & Holding Fixtures:

- | | |
|---------------------|--|
| Clamping cone | SG 40, SG 80, SG 90, SG 90-v |
| Turntable | DT 88K, UNI-DT-2K |
| Cable tensioner | MK-8, DKS-20 |
| Quick action clamps | KSH-6, KSP-8, SHA-12, DES-10, SHA-20, SHA-40, SHA-40-v |
| mm-plug gauge | ML1 for cable isolation pull-off testing |
| Comb tools | KW 1, KW 2 |
| Miniature grips | FSEL, KSEL |
| Power strip | SL-BAT for battery cable terminals |
- For other tools, please see the catalogue.
 Customized tools upon request.

MAV PRÜFTECHNIK GmbH D - 12047 Berlin

Sanderstr. 28 Telefon (030) 693 10 53 Telefax (030) 693 10 69 eMail: info@mav-germany.de

All technical information and specifications are subject to change without prior notice. They represent no promise of characteristics. Modifications are reserved.

Technical Data:

Model designation: FTM
 Indication ranges: 0- 50/100/250/500/1000 N
 0- 2000/5000/10000 N
 Measurement resolution: 4000/5000,
 for exact steps see delivery overview
 Relative derivation in measuring area:
 $\leq \pm 0.25\%$ of value ± 1 digit.

Test Unit FTM (up to 2000N nominal load):

Capacity: 0- 50/100/250/500/1000 N/2000N.
 Dimensions: WxDxH ca. 116x520x124 mm.
 Weight: ca. 12 kg.

Test Unit FTM (5000N-10000N nominal load):

Capacity: 0- 5000/10000 N
 Dimensions: WxDxH ca. 176x636x190 mm.
 Weight: ca. 40 kg.

Construction: Maintenance free metal construction.
 Color: Blue and black, anodized.
 Linear stroke: 150 mm.
 Speed: 100, 300, 600 (300) mm/min.
 (max. tolerance: $\pm 3\%$).

Controls: Customized speeds upon request.
 Keypad control unit with on/off switch and 6 keys for drive control, each 3 keys per direction for test speeds 100, 300, 600 mm/min.

Power supply: 24/36 V DC, via an external power supply.
 Operating mode: Manually; load slide drives while the drive key is actuated and stops automatically at release of the key
 Drive: Step motor with linear drive.

Force Measuring System AMS:

Force Transducer:

Strain gauge- load cells type MWM 80108V with integrated 16 bit AD-converter and RS485 Bus. Overload protection up to 200%.
 Force measuring device:
 Dimension: WxDxH ca. 125x105x70 mm;

Analysis:

Operating modes: Tracking-mode and peak-mode;
 Internal measurement frequency: 10000 Hz;
 Zero point correction, Tare-compensation;
 Optical and acoustical overload indicator;
 Set point value with optical and acoustical alarm;
 Setup menu for parameter setting and adjustment;
 Memory space for 10000 measured values;
 Single- and list output via serial interface;
 Real-time clock for printouts with date and time;
 Language for data output selectable: English, French, German.

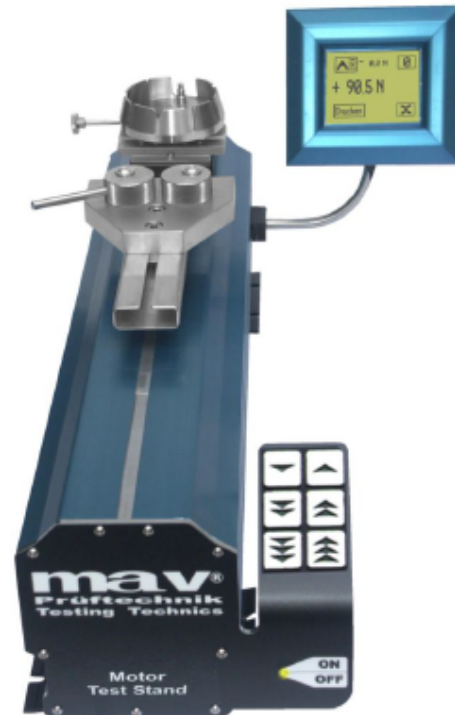
Display:

Backlit LCD-dot matrix-display 128x64p, 56.3x38.4 mm.
 LCD update rate: 5 Hz.
 Input/Handling:

All inputs and actuations made via infrared-touchscreen.

Interface:

RS232C adjustable 1200-38400 Baud, 7/8 data bits, 1/2 Stop bits, parity: none/even/odd. Connector: RJ45 socket (8-pin).



FTM 100 with SG 80 and DKS 20

Optional Accessories:

- Tabletop printer
- Software mavDataEX, -mavSTATLight
- Data transmission cable for printer connection
- Data transmission cable for computer connection
- Other supplies from the catalogue upon request-
- Control system KGM
- Protection covers

MAV PRÜFTECHNIK GmbH D - 12047 Berlin

Sanderstr. 28 Telefon (030) 693 10 53 Telefax (030) 693 10 69 eMail: info@mav-germany.de

All technical information and specifications are subject to change without prior notice. They represent no promise of characteristics. Modifications are reserved.