



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Calidad y
Productividad

DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LA SOLDADURA EN ARNESES AUTOMOTRICES

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestra en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:

Ing. Diana Flores Zúñiga

Dirigido por:

M.I. Javier García Pérez

M.I. Javier García Pérez

Presidente

Dra. Aurora Femat Díaz

Secretaria

M.I. José Agustín Martínez Rodríguez

Vocal

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Suplente

M.I. Arturo Escoto García

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Enero 2023

México



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LA
SOLDADURA EN ARNESES AUTOMOTRICES

por

Diana Flores Zuñiga

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-293073

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mi familia que me ha apoyado en cada uno de mis objetivos y me han dado fuerza para poder cumplir cada uno de ellos. A mi papá José Flores, a mi mamá Cristina Zúñiga y a mi hermana Cristina Flores quienes son mi motor para ser siempre una mejor persona y dar siempre lo mejor de mí en cada actividad que realice.

A mis sinodales quienes me apoyaron en la revisión de esta tesis, me tuvieron paciencia y contribuyeron compartiéndome su experiencia, recomendaciones y sus conocimientos.

A mis compañeros de generación que también me apoyaron durante este proceso y estuvimos juntos en cada reto que se nos presentó.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro por las atenciones brindadas, por contar con excelentes Doctores y Maestros. Doy gracias por haber tenido la oportunidad de ingresar a esta Universidad, la cual me permitió desarrollarme profesionalmente y donde adquirí nuevos conocimientos que me han sido de gran utilidad en la vida laboral y también en la personal. Me permitió conocer nuevas personas y compartir distintas experiencias que ampliaron mi panorama y me permitieron pensar fuera de la caja.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) le agradezco el apoyo de la beca recibida en el programa de Posgrado con la Industria.

Agradezco en especial a mi asesor de tesis el Maestro Javier García Pérez, por la paciencia, por compartirme sus conocimientos y por siempre mostrarme la importancia de aplicar el aprendizaje para la mejora. A la Doctora Aurora Femat Díaz quien me apoyó, me guió para buscar las aportaciones científicas, compartió su amplio conocimiento y brindo consejos que me motivaron a no darme por vencida. Al Maestro Agustín Martínez Rodríguez que me brindo sus recomendaciones con un enfoque en los sistemas de calidad y medición. A la Doctora Claudia Gutiérrez Antonio y al Maestro Arturo Escoto García que también me compartieron retroalimentaciones para la mejora de este proyecto. Al Doctor Eric Huerta Manzanilla que también fue un excelente profesor y a quien admiro mucho por los amplios conocimientos y experiencias que nos compartió durante la maestría. Agradezco de corazón por la gran aportación que recibí de cada uno de los integrantes de mi sínodo y profesores.

También agradezco a la empresa por el apoyo brindado al permitirme poder realizar mi proyecto de tesis dentro de la compañía.

RESUMEN

La unión de dos componentes de un arnés se puede realizar mediante la técnica de soldadura. La principal desventaja es que los defectos son difíciles de detectar y requiere de equipos especializados para visualizarlos. Las fallas de soldadura se pueden prevenir realizando una correcta definición de los parámetros.

La unión de soldadura está compuesta por dos cables de cobre estañado de 0.50 mm^2 y de 0.35 mm^2 . El objetivo de este proyecto es poder definir los parámetros óptimos del proceso para reducir en 50% la ocurrencia del defecto de soldadura desprendida, e incrementar la penetración. Para tal fin se estudiarán las variables de tiempo de rampa ascendente, tiempo de soldadura, tiempo de rampa descendente, potencia y fuerza para así cuantificar el nivel de correlación que existen entre las mismas. Esto se realiza mediante un diseño de experimentos con un nivel de confianza del 95%. Posteriormente se determinan los mejores valores para trabajar en la máquina por medio de una parametrización estadística. El estudio se realiza en una máquina de soldadura por puntos, que utiliza electrodos planos de tungsteno. La comprobación de los resultados se realizó en una máquina universal de prueba de tensión. La fuerza mínima requerida es de 55 N.

Se estudió el proceso de soldadura realizando la caracterización del proceso. El proceso fue aproximadamente normal presentado un p-value $> .05$ en la prueba de Shapiro-Wilk Test. Se observó que la tendencia central fue $\bar{X} = 88.78 \text{ N}$. La dispersión fue $s = 3.39$. En el experimento realizado se observó que el factor más significativo es la potencia.

Palabras clave: *Parametrización, soldadura por resistencia, superficie de respuesta, potencia.*

ABSTRACT

The joining of two components of a harness can be done by welding. The main disadvantage is that defects are difficult to detect and requires specialized equipment to visualize them. Welding failures can be prevented by making a correct definition of the parameters.

The solder joint is composed of two tinned copper wires of 0.50 mm^2 & 0.35 mm^2 . The objective was to define the optimum process parameters. To reduce by 50% the occurrence of the detached solder defect and to increase the penetration. To achieve the objective, the variables of up slope time, welding time, down slope time, power and force will be studied to quantify the level of correlation between them. This is done by means of a design of experiments with a confidence level of 95%. Subsequently, the best values to work on the machine are determined by means of a statistical parameterization. The study was performed on a spot-welding machine. It uses tungsten flat electrodes. The verification of the results was performed on a universal tension testing machine. The minimum force required is 55 N.

The welding process was studied by performing the characterization of the process. The process is approximately normal presenting a p-value $> .05$ in the Shapiro-Wilk Test. It was observed that the central tendency is $\bar{X}=88.78 \text{ N}$. The dispersion is $s = 3.39$. In the experiment conducted, it is observed that the most significant factor is power.

Keywords: *Parameterization, resistance welding, response surface, power.*

Índice general

DEDICATORIAS	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	5
ABSTRACT	7
Índice general.....	8
Índice de figuras.....	10
Índice de tablas	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Justificación	16
1.2 Descripción del problema	17
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	19
2.1 Antecedentes	19
2.1.1 Clasificación de la soldadura	20
2.2 Marco teórico	25
2.2.1 Métodos para la evaluación de la calidad de la soldadura	25
2.2.2 Soldadura por resistencia	29
2.2.3 Parámetros de soldadura por resistencia	30
2.2.4 Parámetros de diseño (PD).....	30
2.2.5 Parámetros de proceso (PP)	30
2.2.6 Parámetros de salida o de respuesta (PR)	30
2.2.7 Discontinuidades en la soldadura.....	32
3 HIPÓTESIS.....	35
4 OBJETIVOS	35
5 METODOLOGÍA	36
5.1 Materiales y equipo.....	39
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
a. Caracterización del proceso de soldadura	44
b. Parametrización del proceso de soldadura	53
c. Superficie de respuesta del proceso de soldadura	54
d. Análisis de Costo Beneficio	61
7 CONCLUSIÓN	61
8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
Anexo A	69

CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL PROCESO DE SOLDADURA.....	69
Anexo B	70
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL EQUIPO DE SOLDADURA	70
Anexo C	71
DISPOSICIÓN DE MATERIAL NO CONFORME.....	71

Índice de figuras

Figura 1 Representación de un conjunto de arneses en un automóvil.....	13
Figura 2 Las cinco principales fases del proceso de soldadura por resistencia.	15
Figura 3 Pareto de defectos de calidad en línea de producción 2021.	18
Figura 4 Clasificación de la soldadura.	20
Figura 5 Soldadura desprendida.	24
Figura 6 Filamentos sobre el aislante.	24
Figura 7 Soldadura corta.	24
Figura 8 Soldadura de buena calidad.	24
Figura 9 Tipos de pruebas no destructivas.	26
Figura 10 Etapas de evaluación de la calidad.	26
Figura 11 Tipos de pruebas destructivas.	28
Figura 12 Pepita de soldadura (nugget).	28
Figura 13 Diagrama de flujo para la metodología propuesta.	36
Figura 14 Diagrama de relación entre parámetros de entrada y salida.	37
Figura 15 Cable A “Jacket cable”.	40
Figura 16 Cable B “Sensor”.	41
Figura 17 Máquina de soldadura Lingl-08.	42
Figura 18 Máquina de tensión MAV.	42
Figura 19 Muestras de piezas de soldadura.	44
Figura 20 Estudio de caracterización de proceso de soldadura por resistencia.	45
Figura 21 Imagen de corrida 1.	47
Figura 22 Imagen de corrida 2.	47
Figura 23 Imagen de corrida 3.	48
Figura 24 Imagen de corrida 4.	48
Figura 25 Imagen de corrida 5.	48
Figura 26 Imagen corrida 6.	49
Figura 27 Imagen de corrida 11.	49
Figura 28 Gráfica de efectos principales.	50
Figura 29 Gráfica de los efectos de la Potencia.	52

Figura 30 <i>Gráfica de los efectos del tiempo.</i>	53
Figura 31 <i>Representación gráfica de contorno del modelo.</i>	55
Figura 32 <i>Gráfica de superficie de perspectiva (malla).</i>	56
Figura 33 <i>Imagen corrida 1 Superficie de respuesta.</i>	56
Figura 34 <i>Imagen corrida 2 Superficie de respuesta.</i>	56
Figura 35 <i>Imagen corrida 3 Superficie de respuesta.</i>	57
Figura 36 <i>Imagen corrida 4 Superficie de respuesta.</i>	57
Figura 37 <i>Imagen corrida 5 Superficie de respuesta.</i>	57
Figura 38 <i>CPK antes de experimentación.</i>	58
Figura 39 <i>CPK después de experimentación.</i>	58
Figura 40 <i>Pareto de defectos de calidad en línea de producción 2022.</i>	60

Índice de tablas

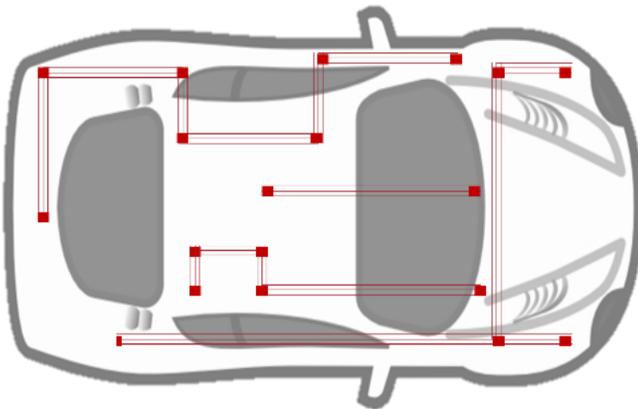
TABLA 1 Tabla de defectos de línea de producción correspondientes al año 2021.....	18
Tabla 2 Principales parámetros de la soldadura por resistencia.	31
Tabla 3 Tabla de los siete pasos para elaboración de AMEF-P.....	34
TABLA 4 Parámetros en la base de datos de la soldadura.	38
TABLA 5 Valores de diseño y características cable.	40
TABLA 6 Valores de diseño y características cable B.....	40
TABLA 7 Parámetros iniciales de soldadura.....	43
TABLA 8 Variables estudiadas en el proceso de soldadura por resistencia.....	45
TABLA 9 Matriz de diseño óptimo de experimentos.....	46
TABLA 10 Análisis de la varianza modelo 1.	50
TABLA 11 Análisis de la varianza modelo 2.....	51
TABLA 12 Análisis de la varianza modelo.....	51
TABLA 13 Análisis de la varianza modelo.....	51
TABLA 14 Resumen de ANOVA.	52
TABLA 15 Efectos de la potencia y el tiempo.	54
Tabla 16 Matriz Experimental Superficie de Respuesta.....	54
TABLA 17 Tabla de defectos de línea de producción correspondientes al año 2022.....	59
Tabla 18 Análisis de Costo Beneficio.....	61

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos están formados por varios componentes, entre los cuales se encuentran los arneses eléctricos. Los arneses son el ensamble de un conjunto de circuitos, que tienen como función transmitir señales eléctricas a todos los sistemas del vehículo. Entre estos sistemas se encuentran el control del motor, el control de puertas y asientos, encender el estéreo, controlar los espejos retrovisores y la cámara de reversa, encender las luces, activar las alarmas, entre otros (Trommnau et al., 2019). En la Figura 1 se muestra una representación de un conjunto de arneses en un automóvil. En términos de valor, los arneses representan menos del 1% del valor agregado del vehículo; sin embargo, son considerados el sistema nervioso central del automóvil (Carrillo & Hinojosa, 2016).

Figura 1

Representación de un conjunto de arneses en un automóvil (Fuente: Elaboración propia).



La unión de dos componentes de un arnés se puede llevar a cabo usando diferentes técnicas. Una de ellas es la unión mediante el proceso de soldadura, la cual es considerada una fusión permanente (Claro et al., 2015). La principal desventaja de esta técnica es que los defectos son difíciles de detectar y se requiere de equipos especiales para visualizarlos. En consecuencia, se puede ver afectada la resistencia de la unión. Además, la probabilidad de que la pieza sufra fatiga se incrementa debido a las propiedades mecánicas de los componentes soldados (Stavridis et al., 2018c).

Los defectos o imperfecciones en la soldadura de un arnés automotriz representan un riesgo para el usuario del vehículo. El incumplimiento de su función pone en riesgo la vida de una persona, en el peor de los escenarios. La calidad del proceso de soldadura se determina por la interacción de diversos parámetros y características mecánicas (Zhou & Yao, 2019). La industria automotriz exige altos niveles de calidad a lo largo de toda la cadena de producción. Existen normas de gestión de calidad que aseguran el cumplimiento de las especificaciones técnicas de los clientes; éstas contribuyen a mejorar la calidad del producto y proceso. Las normas enfatizan en la prevención de los defectos y contribuyen en la reducción de desechos. Una de las herramientas de calidad que tienen un enfoque de prevención es el análisis de modo y efecto de fallas (AMEF), que en su versión más actual permite documentar y evaluar los riesgos técnicos potenciales de la falla de un producto o proceso. El AMEF es un método sistemático que define, identifica y elimina las potenciales fallas en el diseño, proceso o servicio antes de llegar al cliente (baghbani et al., 2019).

Kim et al. (2005) describen que la soldadura por resistencia (RSW por sus siglas en inglés) se basa en el calentamiento establecido en la ley de Joule, la cual consiste en el paso de una corriente corta y elevada que fluye entre los electrodos y a través del material a unir. La ecuación (1) representa la ley de Joule:

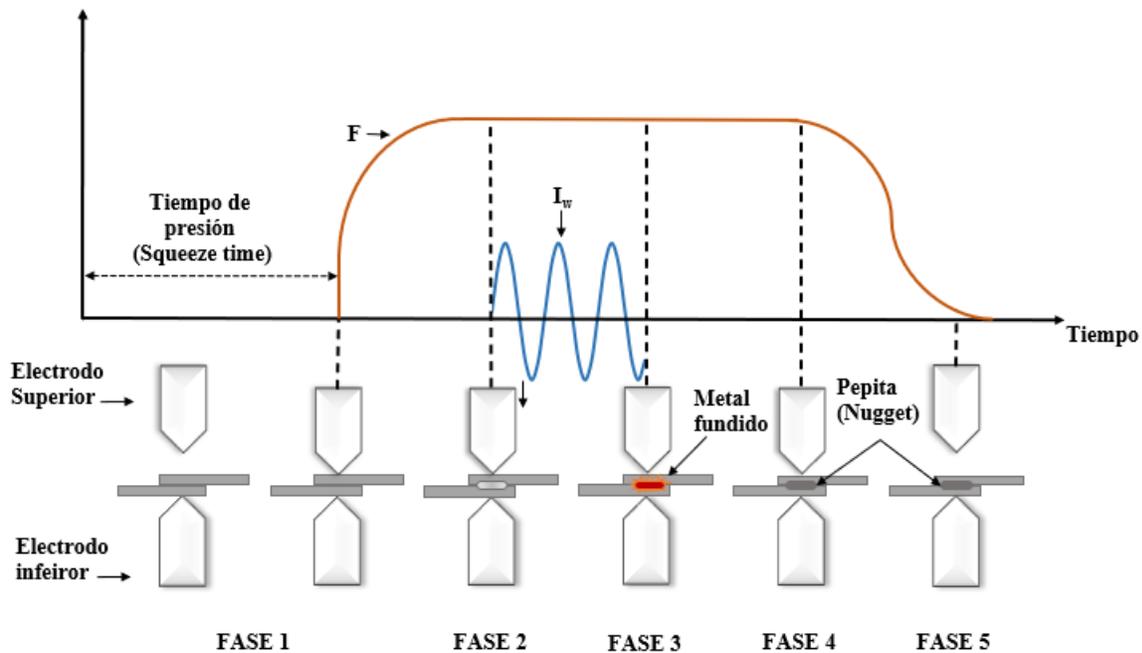
$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I^2(t)R(t)dt \quad (1)$$

donde Q denota la energía entregada al sistema de soldadura en Joules, t_1 y t_2 respectivamente denotan el tiempo de inicio y terminación de la acción de soldadura, $I(t)$ es la corriente de soldadura, $R(t)$ es la resistencia total entre dos electrodos; en casos generales, la resistencia de la carga de soldadura domina la resistencia total (Zhou & Yao, 2019). El proceso de soldadura por resistencia (RSW) se realiza durante un tiempo de apriete denominado tiempo de presión (squeeze time), durante el cual se aplica una fuerza a la unión por parte de los electrodos antes de aplicar el flujo de corriente (Fase 1). A continuación, se crea una resistencia de contacto (Fase 2). Posteriormente, se aplica la corriente de soldadura a la pieza durante un tiempo determinado. El flujo de la corriente produce calor a través de la resistencia de contacto entre el metal y hace que el metal se funda, generando la unión de los metales (Fase 3). Esta unión se conoce como pepita

(nugget). A continuación, se detiene la corriente de soldadura y se sigue ejerciendo presión para unir la soldadura durante un determinado tiempo (tiempo de retención) mientras la soldadura se solidifica (Fase 4). A continuación, los electrodos dejan de interceptar las piezas (Fase 5). La Figura 2 ilustra la secuencia de las cinco fases principales del proceso soldadura por resistencia.

Figura 2

Las cinco principales fases del proceso de soldadura por resistencia (Fuente: Elaboración propia).



Existe una gran cantidad de parámetros involucrados en el proceso de soldadura. Ravichandran et al. (2020) menciona que la calidad de la soldadura depende principalmente de los parámetros de la corriente de la soldadura, el tiempo de presión (squeeze time) y el tiempo de soldadura. Para otros autores, los tres parámetros que determinan el proceso y la calidad son la corriente, el tiempo y la fuerza del electrodo. En la investigación de Zhou & Yao (2019) se menciona que un valor mínimo de corriente puede inducir una soldadura fría, mientras que una corriente excesiva generará una expulsión. Por otro lado, un valor demasiado pequeño de la fuerza del electrodo puede inducir rápidamente la expulsión, mientras que un valor considerable de la fuerza del electrodo puede reducir la eficiencia de la energía térmica y producir una soldadura pequeña debido a que no hay suficiente resistencia de contacto y, en consecuencia, se genera calor. Existen

investigadores que buscan una buena calidad de soldadura optimizando los parámetros. Cada soldadura es diferente debido a la variabilidad de las condiciones de proceso, el ruido y el error. El modelado de las relaciones entre los conjuntos de datos relacionados a un proceso de soldadura es un reto (Amiri et al., 2020; K. Y. Kim & Ahmed, 2018); es por esto que el principal objetivo de la optimización de los parámetros es aumentar la calidad de la soldadura. Si el diseño de experimentos no se define apropiadamente al inicio del estudio se pueden obtener interpretaciones incorrectas de los parámetros significativos en la penetración de la soldadura. También es necesario considerar que en el diseño de experimentos se debe encontrar la cantidad mínima de réplicas a realizar, porque éstas generan un costo para la empresa y no se puede disponer de una cantidad elevada de material.

Se pueden utilizar varias técnicas para seleccionar los parámetros óptimos de soldadura. Una de ellas es el Diseño de Experimentos (DoE). De acuerdo a Vanaret et al. (2021) el DoE tiene como objetivo sugerir experimentos lo más informativos posibles, de forma que los parámetros de un modelo puedan ser estimados con la mayor fiabilidad posible. Idealmente, la formación del problema de optimización del DoE requiere el conocimiento de los parámetros del modelo, cuyos valores válidos son desconocidos. En el artículo publicado por Pronzato (2008) se mencionan algunos de los propósitos del DoE, como la resolución de problemas mediante la optimización, la estimación, la predicción y el control.

Además de todo lo anterior, en el estudio se tienen variables que no se pueden controlar, como el tipo de material que se va a soldar, el tipo de material de los electrodos y el turno en el cual se van a fabricar las piezas. Debido a que el estudio se realizará en una planta de producción es necesario considerar la disponibilidad de los equipos y del personal que realiza los especímenes.

1.1 Justificación

La seguridad de las personas que utilizan vehículos depende de la calidad de cada uno de los componentes con los que fueron fabricados. El arnés de detección del desgaste de balatas advierte al conductor cuando están a punto de llegar al fin de su vida útil. Una falla en este sensor puede llegar a ocasionar un accidente catastrófico al no enviar ninguna señal de alerta.

Los cables de este arnés están unidos mediante un proceso de soldadura. En este proceso por lo general sólo se garantiza la calidad por medio de la realización de pruebas destructivas que verifican la resistencia de las uniones. La realización de estas pruebas es costosa e involucra tiempo, puesto que se utilizan piezas de proceso y no son realizadas a cada pieza producida (Chen et al., 2016; Lee et al., 2001). En un día de producción se realizan hasta 40 pruebas aleatorias.

Por otra parte, el costo por una queja de un cliente que se encuentre en China por una falla en este arnés puede alcanzar hasta \$913,000.00 MXN. Este costo es generado porque es necesario invertir recursos en realizar inspecciones de material, fabricar nuevo producto para realizar reposiciones con cliente, cargos logísticos, cargos por paros de línea, etc. También se debe considerar el costo de piezas rechazadas en soldadura, el cual para el año 2021 fue un total de \$18,500.00 MXN.

La optimización de los parámetros de soldadura mejora la calidad de la pieza. En consecuencia, el riesgo de enviar piezas no conformes al cliente se disminuye y también el costo de scrap. La aplicación de pruebas no destructivas (NDT por sus siglas en inglés) se basa en técnicas que dependen de la aplicación de principios físicos para determinar las características de los materiales, detectar y evaluar defectos de calidad en el producto (Rosado et al., 2010). Estas pruebas podrían garantizar en una sola empresa un promedio de 60,000 arneses semanales, evitando que se genere el 1% de defectos por soldadura no conforme, lo cual en términos de valor representa \$79,400.00 MXN en un año.

1.2 Descripción del problema

De acuerdo con el análisis de scrap de la línea de producción, por medio de la herramienta de Pareto podemos identificar que los defectos de soldadura se encuentran dentro de los primeros tres problemas que se deben de resolver. A pesar de que la soldadura sea el segundo problema para resolver, como se observa en la Tabla 1 y Figura 3, se decidió iniciar con la disminución de scrap de este defecto ya que impacta en la funcionalidad del producto.

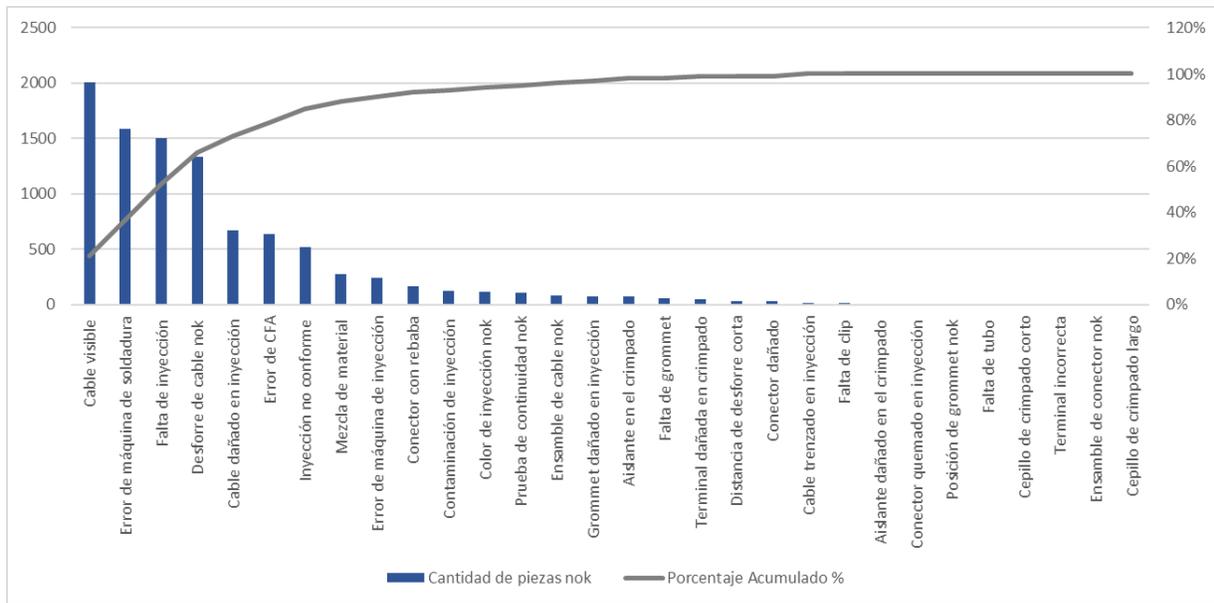
TABLA 1

Tabla de defectos de línea de producción correspondientes al año 2021.

Descripción de la falla	Cantidad de piezas nok	Acumulado	Porcentaje %	Porcentaje Acumulado %
Cable visible	2004	2004	21%	21%
Error de máquina de soldadura	1591	3595	16%	37%
Falta de inyección	1504	5099	15%	52%
Desforre de cable nok	1339	6438	14%	66%
Cable dañado en inyección	667	7105	7%	73%
Error de CFA	639	7744	7%	79%
Inyección no conforme	520	8264	5%	85%
Mezcla de material	277	8541	3%	88%
Error de máquina de inyección	239	8780	2%	90%
Conector con rebaba	163	8943	2%	92%
Contaminación de inyección	122	9065	1%	93%
Color de inyección nok	113	9178	1%	94%
Prueba de continuidad nok	105	9283	1%	95%
Ensamble de cable nok	82	9365	1%	96%
Grommet dañado en inyección	75	9440	1%	97%
Aislante en el crimpado	72	9512	1%	98%
Falta de grommet	60	9572	1%	98%
Terminal dañada en crimpado	52	9624	1%	99%
Distancia de desforre corta	34	9658	0%	99%
Conector dañado	31	9689	0%	99%
Cable trenzado en inyección	18	9707	0%	100%
Falta de clip	12	9719	0%	100%
Aislante dañado en el crimpado	8	9727	0%	100%
Conector quemado en inyección	7	9734	0%	100%
Posición de grommet nok	7	9741	0%	100%
Falta de tubo	4	9745	0%	100%
Cepillo de crimpado corto	3	9748	0%	100%
Terminal incorrecta	3	9751	0%	100%
Ensamble de conector nok	2	9753	0%	100%
Cepillo de crimpado largo	1	9754	0%	100%

Figura 3

Pareto de defectos de calidad en línea de producción 2021 (Fuente: Elaboración propia).



2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes

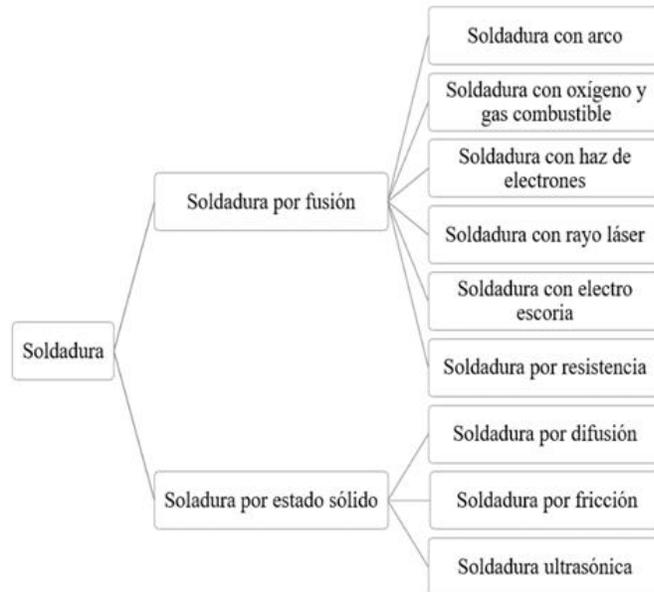
Distintos sectores de la industria optan por utilizar la soldadura en procesos que requieren la unión de metales. Los usos más comunes de la soldadura incluyen los sectores de construcción, producción de tuberías, industria aeronáutica, espacial, ferroviaria y automotriz (Chen et al., 2016).

Existen diferentes formas de realizar la unión de dos componentes de un arnés; para algunos casos se requiere la unión por medio de soldadura. La soldadura es considerada una operación de ensamble, donde se realiza la unión de dos o más piezas de metal de forma permanente. Con base en la necesidad de realizar la unión de metales en una sola pieza se originó este proceso. Existen más de 50 diferentes tipos de soldadura, mostrados en la Figura 4; éstos se encuentran clasificados en dos grupos, soldadura por fusión y soldadura de estado sólido (Claro et al., 2015).

El ensamble de un conjunto de arneses debe poseer ciertas condiciones y características para proporcionar una señal eléctrica continua y confiable. Algunas de ellas son el tipo de material, calibre, protecciones y empalmes sólidos, siendo este último uno de los procesos más críticos.

Figura 4

Clasificación de la soldadura (Fuente: Elaboración propia).



2.1.1 Clasificación de la soldadura

Se le llama soldadura por fusión a la unión de los metales por medio de la fundición de dos o más superficies; en algunos casos se agrega un metal de relleno para incrementar el volumen y fortalecer la coalición (Claro et al., 2015). La soldadura por fusión se clasifica en soldadura con arco, con oxígeno y gas combustible, con haz de electrones, con rayo láser, con electroescoria y soldadura por resistencia. La soldadura con arco consiste en realizar la fusión de metales a través del calor que se genera por una descarga de corriente (Juan & Maturana, 2011). La soldadura con oxígeno y gas combustible se realiza por medio de una flama caliente que proviene de la combustión de un gas de oxígeno; la flama se dirige por medio de un soplete, a esta soldadura se le puede agregar un metal de relleno (Principal et al., 2006). En la soldadura con haz de electrones no se requieren fundentes ni metales de relleno, ya que se genera una corriente concentrada de electrones de alta intensidad provocando el calor requerido para fundir los metales (Chiumenti et al., 2013). La soldadura con rayo láser se realiza por medio de la energía que produce un haz luminoso altamente concentrado. La soldadura con electroescoria se realiza por medio de la fundición de alguna escoria que conduce el calor al metal base y de relleno. La soldadura con termita se obtiene a través de una reacción química provocada por una termita sobre un metal fundido super calentado, donde se genera calor para fundir los metales (Claro et al., 2015).

La soldadura por resistencia se utiliza en los procesos de ensamble de los arneses eléctricos automotrices; ésta requiere de una resistencia eléctrica que transporta el flujo de corriente con la que se calientan las superficies en contacto con las piezas metálicas sostenidas bajo presión; esta soldadura no requiere aporte, fundente ni gases protectores (Dobrąnszky et al., 2012). La soldadura por resistencia recibe su nombre porque los materiales tienen una oposición al flujo de la corriente y se calientan hasta llegar a su punto de fundición (Summerville et al., 2019). El proceso involucra principalmente tres parámetros como variables significativas: la corriente, la fuerza y el tiempo de soldadura (Akkas, 2017; Khan et al., 2017; Lee et al., 2001).

La soldadura por estado sólido produce uniones a temperaturas por debajo del punto de fusión de los materiales primarios. Éstas suelen estar libres de defectos de solidificación y no requieren del uso de gas protector, metal de relleno o fundentes (Nee, 2015). En la soldadura por difusión se tiene una pieza sujeta a presión durante un largo tiempo a una temperatura elevada. Esta soldadura está determinada por la temperatura y el tiempo de permanencia (Gietzelt et al., 2017). La soldadura por fricción se realiza con una herramienta rotativa con un perfil determinado que se mueve hacia adelante a lo largo de la línea de soldadura. La fricción entre la herramienta y la pieza es la responsable de la generación de calor y el ablandamiento del material. A medida que la herramienta avanza, la soldadura se forma por la agitación del material (Dialami et al., 2017). La soldadura ultrasónica se basa en la vibración, la pieza que será ensamblada vibra contra una pieza estacionaria; esta vibración causa la generación de calor que derrite los materiales para formar la unión. La calidad de estas uniones depende en gran medida de los parámetros de soldadura (Kalyan Kumar & Omkumar, 2020). Para detectar la calidad de la soldadura se han utilizado diferentes métodos.

Normalmente la evaluación de la calidad de la soldadura se realiza mediante pruebas de tensión que no son hechas en tiempo real; por lo que se ha propuesto el análisis del proceso en línea, utilizando herramientas matemáticas para establecer modelos y simular el proceso. Estas herramientas utilizan señales de sensores externos (Zhou & Yao, 2019). Otra manera a través de la cual se evalúa la calidad de la soldadura es por el efecto de las tensiones residuales en los componentes soldados (Olabi et al., 2014).

La determinación de los parámetros del proceso de soldadura se puede realizar por medio del diseño de experimentos. El diseño de experimentos es un procedimiento para planificar y definir las condiciones para realizar pruebas experimentales controladas. La variable de respuesta $y(x)$ que se mide en un experimento puede ser modelado como

$$y(x) = y_t(x) + \varepsilon \quad (2)$$

donde y_t es la respuesta verdadera y ε representa el error aleatorio (Garud et al., 2017). En la industria es importante reducir costos por tal motivo es deseable disponer de buenos estimadores de los parámetros del modelo para obtener la mejor calidad de la inferencia estadística. Para ello, la planificación de la muestra se convierte en una etapa crucial para el desarrollo del estudio donde entran en juego factores económicos y otras limitaciones. El diseño experimental óptimo (DoE) se dedica a diseñar el estudio para lograr eficazmente sus objetivos con un costo mínimo.

Una metodología que realiza estimaciones para mejorar la calidad y ayuda a encontrar los mejores valores paramétricos para un producto es la herramienta estadística de Taguchi. Esta herramienta tiene como objetivo encontrar las configuraciones óptimas de los factores de un proceso. Taguchi diseñó algunos arreglos ortogonales estándares que utilizan una estimación independiente de dos o más factores, para que su efectividad influya en la inestabilidad de una progresión particular de una característica que se puede realizar llevando a cabo el menor número de corridas (Srinivasan et al., 2020). La optimización de los parámetros de un proceso de soldadura contribuye a obtener piezas de buena calidad. Con base en la literatura se tiene evidencia de que el diseño de experimentos es una herramienta que aproxima y es eficiente para optimizar los parámetros de algún proceso. También se ha demostrado que la metodología de superficie de respuesta (RSM por sus siglas en inglés) es una herramienta que determina los efectos de cada factor y las interacciones entre ellos. La RSM reduce la cantidad de experimentos necesarios para la evaluación, análisis y optimización de los parámetros de proceso. RSM y Taguchi pertenecen al diseño factorial; analizando el experimento utilizando ANOVA o los análisis de regresión. El objetivo principal del RSM es la optimización de los factores que podrían tener efectos de orden

superior (Sathish et al., 2020) .

En la formación de fallas y en la calidad de la soldadura se deben tomar en cuenta las propiedades del material, las herramientas para soldar y los parámetros críticos de proceso. Existen defectos como la porosidad y agrietamiento, la falta de penetración (LOP por sus siglas en inglés), los defectos de túnel, los defectos de óxido atrapado, entre otros (Tabatabaeipour et al., 2016). Se ha encontrado que un tiempo excesivo genera defectos en la soldadura (Akkaş, 2017).

Las piezas sin soldar, con tamaño de soldadura inapropiada y con expulsión, también son consideradas fallas de soldadura que deben de ser evitadas. La expulsión en la soldadura es considerada un indicador de calidad en las industrias. Existen más indicadores que también pueden ser analizados como el tamaño de la pepita (nugget), la zona afectada por el calentamiento (HAZ por sus siglas en inglés), la profundidad de penetración de la soldadura y la fuerza mecánica (Wang et al., 2017). Algunas muestras de defectos en la soldadura se pueden observar en las siguientes figuras. La soldadura desprendida, que se representa en la Figura 5, es un defecto que afecta directamente la funcionalidad del arnés. Los filamentos sobre el aislante y la soldadura corta, Figuras 6 y 7, son considerados defectos que contaminan y disminuyen la propiedad física de la soldadura, provocando que con la manipulación del material la unión se desprenda con facilidad. Dentro del proceso de soldadura existen cambios que deben ser considerados para obtener piezas de buena calidad. Estos cambios pueden ser consecuencia del desgaste de los electrodos y del material con el que son fabricados. En la Figura 8 se muestra una pieza con soldadura de buena calidad.

Figura 5
Soldadura desprendida (Fuente: Elaboración propia).



Figura 6
Filamentos sobre el aislante (Fuente: Elaboración propia).



Figura 7
Soldadura corta (Fuente: Elaboración propia).

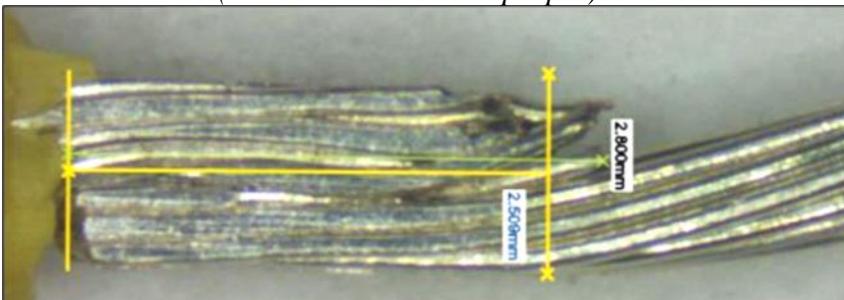
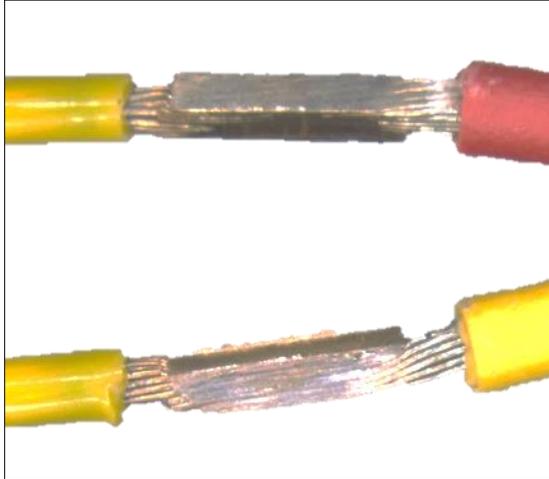


Figura 8
Soldadura de buena calidad (Fuente: Elaboración propia).



El desgaste de los electrodos da como resultado una disminución en el tamaño de la soldadura. La vida de un electrodo está definida por un número de soldaduras aplicadas, y que puede ser definido por un límite del tamaño de la soldadura (Williams & Parker, 2004). En la industria automotriz después de realizar la identificación de potenciales fallas en el proceso de soldadura se utilizan métodos de evaluación y monitoreo de la calidad; éstos son las pruebas destructivas y no destructivas. Las pruebas son aplicadas aleatoriamente a pequeñas muestras de piezas de producción, debido a su alto costo y tiempo de realización (Zhou & Cai, 2013).

2.2 Marco teórico

2.2.1 Métodos para la evaluación de la calidad de la soldadura

Las pruebas no destructivas (NDT por sus siglas en inglés) utilizan principios físicos para determinar las características de los materiales con la finalidad de detectar y evaluar los defectos que afectan la unión de la soldadura (Senthil et al., 2019; Seyfpour et al., 2018). Algunos ejemplos de pruebas no destructivas se ven reflejadas en la Figura 9, las cuales describen la interacción de los parámetros de soldadura y la geometría óptima de la unión.

Figura 9

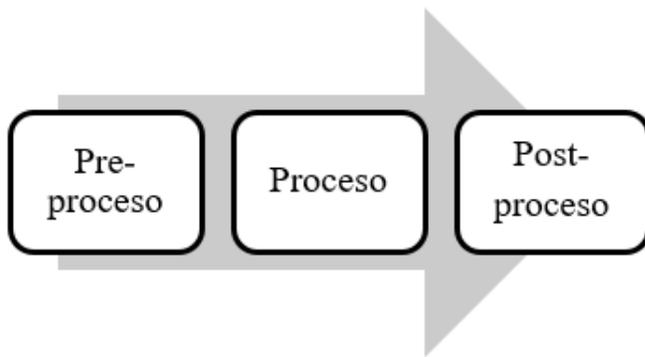
Tipos de pruebas no destructivas (Fuente: Elaboración propia).



La evaluación de la calidad de la soldadura se puede realizar en tres diferentes etapas del proceso (Stavridis et al., 2018a, 2018b), las cuales son mostradas en la Figura 10. Existe una amplia gama de métodos de pruebas no destructivas. Las pruebas no destructivas se pueden realizar en la fase del pre-proceso o en la fase del proceso de soldadura.

Figura 10

Etapas de evaluación de la calidad (Fuente: Elaboración propia).



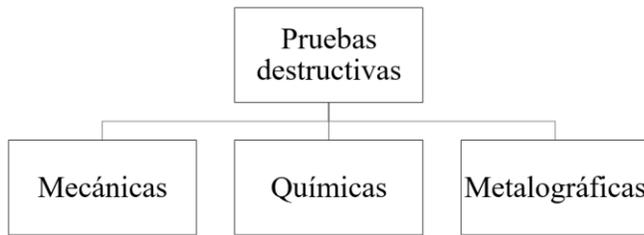
Los métodos más utilizados son el ultrasonido, la corriente de Foucault (eddy current), los rayos X, la inspección por partículas magnéticas y por líquidos penetrantes (Rosado et al., 2010). La principal ventaja de estas pruebas es que el componente no sufre ninguna alteración, y puede ser utilizado en caso de que no se detecte ningún defecto de acuerdo al criterio de aceptación definido (Javadi, Sweeney, et al., 2020). La prueba ultrasónica es ampliamente utilizada en la industria, y se basa en la respuesta de una matriz de ultrasonidos transductores que miden ondas que se

reflejan en la superficie posterior del metal. Otro método son las técnicas de visión artificial; éstas realizan la detección de fallas de soldadura mediante un análisis de la información contenida en las imágenes (Stavridis et al., 2018c). Una de las aplicaciones más relevantes de la visión artificial es la termografía infrarroja. Esta técnica de detección se utiliza en las aplicaciones de soldadura láser para capturar la distribución de la temperatura del componente soldado a través de una cámara térmica. Esta técnica ha sido muy poco estudiada para dicha aplicación. Lo anterior se debe al hecho de que los módulos de las cámaras infrarrojas tienen una dependencia a la emisión del material. Por lo tanto, no pueden inspeccionar adecuadamente las características y defectos de la soldadura que correspondan a otros factores que no sean la temperatura. La prueba eddy current se utiliza para detectar y dimensionar grietas de fatiga, y se basa en principios electromagnéticos y en la ley de Faraday (Javadi, Mohseni, et al., 2020; Seyfpour et al., 2018), la cual consiste en establecer un flujo magnético haciendo pasar la corriente alterna a través de una bobina. Al acercar la bobina a la muestra de prueba se observan cambios en la corriente y los cambios se interpretan en la impedancia de la bobina o la caída del voltaje (Gupta et al., 2018). La prueba de líquidos penetrantes es un método para identificar los defectos de la superficie. Este método detecta discontinuidades abiertas a la superficie en materiales ferrosos y no ferrosos no porosos (Senthil et al., 2019).

Las pruebas destructivas tienen como objetivo evaluar la calidad de la unión de la pieza para asegurar que se cumpla con la propiedad de resistencia para la que fue diseñada. En la Figura 11 se muestran los tipos de pruebas destructivas aplicadas en la soldadura, y son categorizadas como pruebas mecánicas; éstas no pueden ser realizadas durante el proceso de soldadura. La principal ventaja es que las mediciones son cuantitativas. Algunos ejemplos de estas pruebas son las pruebas de tensión, la medición de la resistencia y la evidencia de expulsión (Ling et al., 2010). El diámetro de la pepita (nugget) es un criterio que usualmente se utiliza para la estimación de la calidad de la soldadura (Zhou & Cai, 2013).

Figura 11

Tipos de pruebas destructivas (Fuente: Elaboración propia).



Una representación del diámetro de la pepita de la soldadura (nugget) se puede observar en la Figura 12. El diámetro de la pepita se utiliza para inferir la fuerza de la unión y en la cantidad de energía que se absorbe antes de que se desprenda. Las pruebas de tensión utilizan una máquina que determina la resistencia de la unión en condiciones de carga cuasi estática, y permiten tomar medidas del diámetro de la pepita después de la falla (Summerville et al., 2019).

Figura 12

Pepita de soldadura (nugget). (Fuente: Elaboración propia).



De acuerdo a la literatura existen dos metodologías que son utilizadas para mostrar el efecto de los parámetros de corriente, tiempo y fuerza en la resistencia de la soldadura, éstos son el método estático y el método dinámico. En el método estático la resistencia de contacto se calcula bajo una serie de situaciones controladas, manteniendo los parámetros fijos durante la medición. Los parámetros se pueden cambiar en un rango para obtener los efectos en la resistencia de la soldadura. Para estudios paramétricos este método es adecuado, pero sólo conduce algunos resultados discretos y no proporciona los efectos de un parámetro que esté cambiando continuamente. La resistencia estática determina la magnitud necesaria de la corriente de soldadura. En el método dinámico la resistencia de la soldadura se examina en el momento que se realiza el proceso. Este método determina la magnitud de la corriente necesaria para la soldadura. La resistencia dinámica es de mayor relevancia y especifica todo lo que ocurre durante el proceso

de soldadura (Hamedi & Atashparva, 2017). A esta resistencia se le ha considerado una de las mejores opciones para el monitoreo de los procesos de soldadura y desarrollo de fallas de soldadura; no obstante cuenta con la limitante ya que el registro del tiempo es muy discontinuo, puesto que se realiza en un sólo momento perteneciente a cada medio ciclo (Ling et al., 2010).

2.2.2 Soldadura por resistencia

La soldadura por resistencia es un proceso termo eléctrico en el cual se genera calor en el área de las piezas que se van a unir. El calor se genera introduciendo corriente eléctrica a través de las piezas durante un lapso de tiempo y presión controlados. Los parámetros más representativos que influyen en la calidad de la soldadura son el material, la energía, la fuerza de soldado y el tiempo (Alexy et al., 2017). Para expresar la cantidad de calor generado se utiliza la ley de Joule; esta ley dice que el calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente eléctrica y directamente proporcional al cuadrado de la resistencia eléctrica y tiempo como se indica en la Ecuación 3 (Gil, 2007).

$$Q = I^2Rt \quad (3)$$

Q = Calor generado (Joules)

I = Corriente eléctrica (Amperes)

t = Tiempo de duración de la corriente (Segundos)

R = Resistencia del material (Ohms)

La resistencia cambia conforme se aplica presión. Los materiales que se van a soldar son presionados por la fuerza aplicada por los electrodos para que pueda pasar la corriente. Si se aumenta la presión de soldadura se aumentará el amperaje hasta llegar a un límite. La presión afecta el punto de fusión. Aplicar una fuerza apropiada genera un mejor contacto en la zona a unir.

El balance de calor se genera cuando la penetración o profundidad de fusión en ambos componentes son iguales. Se presentará una deformación en la unión si el calor no es distribuido correctamente. El desequilibrio de calor se puede afectar por la conductividad térmica y eléctrica

de los materiales y electrodos, también por la geometría de las piezas y de los electrodos. El calentamiento no uniforme se puede disminuir con tiempos de soldadura más breves y con un nivel de corriente baja obteniendo soldaduras aceptables (O'Brien et al., 1996).

2.2.3 Parámetros de soldadura por resistencia

En el proceso de soldadura por resistencia existen parámetros de diseño, parámetros proceso y parámetros de respuesta (Ahmed et al., 2019).

2.2.4 Parámetros de diseño (PD)

Los parámetros de diseño (PD) representan las condiciones de diseño de la soldadura. En los parámetros de diseño se considera el espesor del material, tipo de material a soldar, tipo de electrodos, material y/o recubrimiento de los electrodos, peso del recubrimiento, la máquina a utilizar, etc. Estos parámetros se definen desde el inicio del proyecto y se determina de acuerdo a las necesidades y requerimientos del cliente. Es necesario conocer la función final del producto para poder determinar que tipo de soldadura se debe de utilizar.

2.2.5 Parámetros de proceso (PP)

Los parámetros de proceso son los que se definen para realizar la soldadura utilizando los parámetros de diseño y son atributos definidos que permiten controlar la funcionalidad de operación de algún equipo o máquina. En el caso de la soldadura son los parámetros que intervienen durante el proceso de unión de los metales. Por ejemplo, la fuerza de soldadura, la corriente de soldadura, el tiempo de soldadura, el tiempo ciclo de soldadura, la potencia, entre otros. La calidad de la soldadura depende de la correcta definición de los valores en los que se debe de trabajar cada parámetro.

2.2.6 Parámetros de salida o de respuesta (PR)

Los parámetros de salida son las respuestas que se obtienen al modificar los parámetros de proceso. Por ejemplo el ancho de la pepita, la fuerza de resistencia a la tensión de la soldadura, el desplazamiento o penetración de la soldadura, entre otros.

Los principales parámetros que intervienen en en la soldadura por resistencia se presentan en la Tabla 2 que se muestra a continuación.

Tabla 2
Principales parámetros de la soldadura por resistencia.

Tipos de características	Nombres de características	Unidades
Parámetros de diseño (PD)	Material	-
	Sección transversal de material	mm^2
	Tipos de electrodos	-
	Tamaño de electrodos	mm
	Material de electrodos	WS
Parámetros de proceso (PP)	Tiempo	ms
	Corriente	A
	Voltaje	V
	Fuerza	N
	Potencia	W
Parámetros de respuesta (PR)	Penetración	μm
	Fuerza de desprendimiento	N

Tiempo de soldadura

Es el periodo de tiempo que se requiere para realizar un punto de soldadura. Es un parámetro importante en el proceso de soldadura. Un periodo corto de tiempo generará que no llegue a formarse el punto de soldadura ya que el metal no se fundirá, esto hará que la pieza tenga una baja calidad de la soldadura y pueda desprenderse con facilidad. Por otro lado, un periodo largo de tiempo generará que la temperatura en el punto de soldadura exceda a la temperatura del punto de fusión del metal y pueda causar defectos como expulsión del material, incremento de la zona afectada por el calor (HAZ) o expulsión de gases o de vapor metálico, generados en el interior del punto de soldadura.

Corriente de soldadura (Amperaje)

Este parámetro corresponde al flujo de corriente que se requiere para fusionar los metales. Si se aplica un exceso de corriente se provocarán defectos en la calidad de la soldadura tales como depresiones profundas, un bajo nivel de penetración y un deterioro prematuro de los electrodos.

Voltaje de soldadura

La corriente eléctrica circula a través de un circuito al existir una presión que impulse el flujo de electrones dentro de un conductor. Esta presión se denomina diferencia de potencial o voltaje.

Presión de soldadura (Fuerza)

Este parámetro se refiere a la fuerza que ejercen los electrodos sobre el material a ser soldado. Esta fuerza se requiere para asegurar un buen contacto eléctrico entre el metal que será soldado y también mantiene fijo el material hasta que el metal fundido se solidifique.

Potencia de soldadura

Este parámetro hace referencia a la ley de Watt que menciona que la potencia eléctrica de un componente electrónico se define como la potencia consumida por la carga es directamente proporcional al voltaje suministrado y a la corriente que circula por este.

2.2.7 Discontinuidades en la soldadura

La selección incorrecta de los parámetros de soldadura generará discontinuidades en la soldadura. Estas discontinuidades pueden ser internas y externas.

Las discontinuidades internas se pueden clasificar en porosidad y fisuras; para ser observadas se deben utilizar pruebas metalográficas, ultrasonidos o rayos x. Las discontinuidades externas son las que se encuentran en las superficies externas de la soldadura y normalmente pueden ser

detectadas a simple vista.

Para determinar si la soldadura es conforme se deben de establecer ciertos criterios de calidad. Éstos dependen de la colocación de la pieza y de la fuerza a la que estará sometida en su uso final (Zappia, 2009). En el desarrollo de un producto se analizan los riesgos que pueden existir en el proceso de fabricación. Se deben de identificar las fallas que pueden ocurrir en cada una de las partes, sub ensambles o componentes del producto. Desde los años sesenta se desarrolló una técnica para analizar y prevenir todos los posibles modos de falla. Esta técnica se llama FMEA. En el manual de FMEA 1ª Edición de AIAG-VDA un modo de falla se define como la pérdida total o parcial de la función de un sistema; éstas son consideradas como errores o defectos que afectan especialmente al cliente. En el análisis de modo y efecto de falla (FMEA) son la parte más crítica y deben ser apropiadamente identificadas. El FMEA es una técnica cualitativa y analítica para definir, identificar y eliminar potenciales fallas en la producción, el sistema y el proceso (Li et al., 2020). En la industria automotriz se utilizan normas internacionales como ISO 9001:2015 e IATF 16949, las cuales plantean la necesidad de un pensamiento y una gestión de calidad basados en el riesgo. El grupo de Acción de la Industria Automotriz (AIAG) se ha agrupado con la Asociación Alemana de la Industria Automotriz (VDA) para mejorar y armonizar sus prácticas de FMEA. Esta armonización muestra cambios drásticos al momento de realizar la evaluación de riesgos. Las organizaciones están eliminando los números de prioridad de riesgos (RPN) y sustituyéndolas por prioridad de acción (AP) (Jing, 2019). Los RPN se obtienen de las multiplicaciones de los factores de riesgo, como ocurrencia (O), severidad (S) y detección (D) (Li et al., 2020)

Las acciones de detección evitan enviar potenciales fallas al cliente. Se enfocan en la localización y prevención de los defectos antes de que ocurran. El análisis de todas las posibles fallas en un proceso o producto durante la etapa de diseño favorece a la prevención de fallas potenciales del producto y proceso. Las acciones de detección no previenen, contribuyen a no enviar potenciales fallas a cliente. Las acciones derivadas del análisis se deben de enfocar en la prevención de los defectos en donde ocurren. El análisis de todas las posibles fallas en un proceso o producto durante la etapa de diseño favorece a la prevención de fallas potenciales del producto y proceso. De acuerdo al manual de AMEF 1ª Edición de AIAG-VDA el desarrollo de un AMEF de Proceso se

elabora con un enfoque de siete pasos, los cuales se muestran en la Tabla 3.

El AMEF es un documento vivo, que se revisa y actualiza cuando sea necesario (considerar que en inglés no es lo mismo “review” que “revisión”, “review” es confirmar que es adecuado y “revisión” es actualizar por corrección o mejora), y se debe revisar (review) mínimo por:

- IATF 16949 10.2.3 Reclamaciones de cliente.
- PPAP Tabla 3.2 Cambios al producto (cambios de ingeniería).
- PPAP Tabla 3.1 e IATF 16949 y 8.5.6.1.1 Cambios al Proceso, permanentes o temporales.
- IATF 10.3.1 Mejora continua (no está establecido un requisito de periodicidad o frecuencia).

El AMEF es una de las formas efectivas para detectar y prevenir fallas en los procesos.

Tabla 3

Tabla de los siete pasos para elaboración de AMEF-P (Fuente: FMEA 1ª Ed. AIAG- VDA).

Pasos	1	2	3	4	5	6	7
Nombre	Planeación	Alcance	Funciones	Falla	Riesgo	Optimización	Documentación
Obs.	Definición de fronteras (alcance).	Pasos de proceso.	Cascada de funciones al cliente.	Diagrama de Causa Efecto de 4-M.	Calificación de S, O, D y Prioridad de la Acción.	Implantación.	Medición de eficacia de acciones.

Las fallas de la soldadura pueden conducir a un evento catastrófico. Esta es la razón por la que varios autores se enfocan en la evaluación de la calidad de la soldadura en tiempo real. Con base en el estándar de la norma ISO 6520, Pereira & De Melo (2020) propuso que los principales defectos de soldadura que se deben analizar son grietas, cavidades o porosidades, inclusiones sólidas, falta de fusión y penetración de la soldadura, defectos de forma y dimensionales. Los parámetros del proceso de soldadura deben ajustarse para garantizar la resistencia a la tensión. Los resultados de las pruebas de tensión pueden ser comparados contra una métrica establecida de acuerdo al producto o ensamble, debido a que son datos cuantitativos. Esto garantiza la confiabilidad de la soldadura durante la vida útil del vehículo.

La confiabilidad es la evaluación completa del ciclo de vida de un producto. No debe confundirse con calidad ya que este término se refiere a una evaluación de rendimiento en un

momento determinado. Existen modelos estadísticos que son utilizados para analizar y predecir la mayor probabilidad de falla de los productos. Una función de densidad de probabilidad ampliamente utilizada en la industria es el análisis estadístico de Weibull (Azeez et al., 2019). Esta distribución modela tiempos de falla de productos compuestos por muchos componentes que tienen distribuciones de vida comparables. La ventaja del análisis de Weibull es evaluar de manera efectiva la probabilidad de falla y proporcionar predicciones de falla razonables para componentes o materiales. En la industria automotriz el análisis de Weibull es utilizado para analizar estadísticamente la confiabilidad de la unión de las terminales de un arnés.

3 HIPÓTESIS

Hipótesis

Al parametrizar el proceso de soldadura utilizando el algoritmo de Fedorov, mediante las variables de tiempo, fuerza y potencia, una interrelación de éstas define la adecuada penetración de la soldadura y su calidad en arneses automotrices.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Disminuir al menos el 50% de la ocurrencia del defecto de soldadura desprendida, comprobando que la penetración puede ser considerada una característica de evaluación de la calidad.

4.2 Objetivos específicos

1. Determinar entre los factores de tiempo, fuerza y potencia, los significativos en la penetración de la soldadura, así como las interacciones.
2. Caracterizar los parámetros y encontrar la mejor combinación para mejorar la calidad de la pieza planeando y ejecutando un diseño de experimentos en la máquina de soldadura Lingl-08, en donde se debe definir estadísticamente el tamaño de muestra para realizar la experimentación en un periodo de 3 meses.

3. Parametrizar las variables de tiempo, fuerza y potencia para cuantificar el nivel de correlación que existen entre las mismas.
4. Optimizar los parámetros de la soldadura para disminuir al menos el 50% de ocurrencia, comprobando que las piezas cumplen con la resistencia de unión mínima de 55 N establecida por los requerimientos de cliente, las piezas serán sometidas a una prueba de tensión en el equipo de prueba MAV.

5 METODOLOGÍA

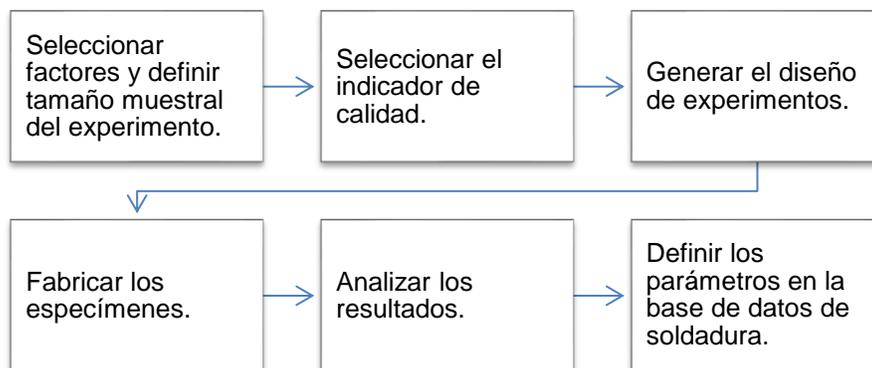
La investigación se realizará en una planta de producción del ramo automotriz, dedicada a la fabricación de arneses la cual será denominada como “La empresa automotriz”. La información sensible será tratada bajo confidencialidad.

En este proyecto se propone encontrar los mejores parámetros de soldadura para mejorar la calidad de la soldadura en la fabricación de arneses realizando un diseño de experimentos. Se analizarán los parámetros de tiempo, corriente y potencia para determinar los más significativos en la penetración de soldadura y en la fuerza de resistencia a la tensión.

Los pasos a seguir son seleccionar los factores y determinar el tamaño muestral del experimento, seleccionar el indicador de calidad, generar el diseño de experimentos, fabricar los especímenes, analizar los resultados y definir los parámetros en la base de datos de soldadura. Estos pasos se pueden observar en la Figura 13.

Figura 13

Diagrama de flujo para la metodología propuesta (Fuente: Elaboración propia).

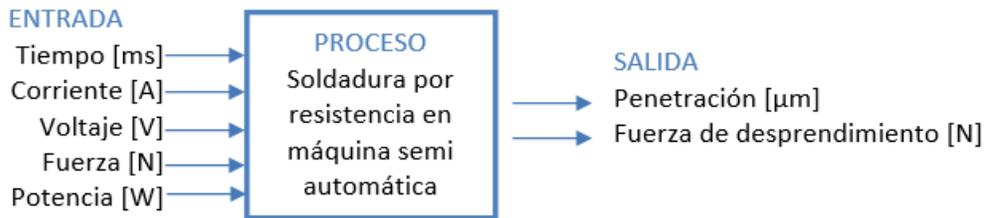


1. Seleccionar factores y definir tamaño muestral del experimento.

Numerosos factores tienen influencia en la calidad de la soldadura. En este estudio se utilizarán tres. Los factores serán: el tiempo, la fuerza y la potencia. El efecto de estos tres factores y sus interacciones sobre la penetración y resistencia de la soldadura serán evaluados, como se puede observar en la Figura 14. Las variables que no es posible controlar son el turno en el que se realice el estudio, el tipo de electrodos que se utilizarán, la longitud de desforre de los cables y el tipo de material de los cables.

Figura 14

Diagrama de relación entre parámetros de entrada y salida (Fuente: Elaboración propia).



2. Seleccionar el indicador de calidad

De acuerdo a la especificación de calidad de soldadura por resistencia AWS D8.1M: 2007 de los estándares de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS por sus siglas en inglés), existen características en la pepita de la soldadura que son consideradas indicadores de calidad como el tamaño, la penetración, la geometría, etc. (Ouafi et al., 2011). En esta investigación se seleccionará la penetración de la soldadura como indicador de calidad y se comprobará con el resultado de la fuerza que se obtenga en la prueba de tensión.

3. Generar el diseño de experimentos.

Para iniciar la metodología es necesario definir el tamaño muestral del experimento, por lo que se

realizará un diseño de experimentos a un nivel de confianza del 95%.

4. Fabricar los especímenes.

Con base a los resultados del experimento es necesario iniciar con la fabricación de los especímenes en la máquina de soldadura de nombre Lingl-08. Se guardará la información de los parámetros de tiempo, fuerza y potencia que se utilizarán más adelante para el análisis del experimento. Para obtener estos datos se requiere soporte del especialista de soldadura puesto que él es la persona que cuenta con el acceso a la información en la máquina de soldadura.

5. Analizar los resultados.

Para realizar el análisis se generará un análisis de varianza ANOVA con un nivel de significancia del 95%, donde se representarán los factores más significativos en la penetración de la soldadura.

6. Definir los parámetros en la base de datos de soldadura.

El parámetro de respuesta (PR) será la penetración de la soldadura, expresado en micras (μm). El experimento se comprobará midiendo la fuerza de desprendimiento, expresada en newtons (N) realizando una prueba destructiva de tensión utilizando un probador MAV. De la base de datos obtenida al fabricar los especímenes se incluyen dos grupos de parámetros de entrada, los de diseño y los de proceso. Los parámetros de diseño (PD) representan las condiciones de diseño de la soldadura. Los parámetros de proceso son los que se definen para realizar la soldadura utilizando los parámetros de diseño (Ahmed & Kim, 2017). Esta información se representa en la Tabla 4.

TABLA 4

Parámetros en la base de datos de la soldadura (Fuente: Elaboración propia).

Tipos de características	Nombres de características	Unidades
Parámetros de diseño (PD)	Material	-
	Sección transversal de material	mm^2
	Tipos de electrodos	-

	Tamaño de electrodos	<i>mm</i>
	Material de electrodos	<i>WS</i>
Parámetros de proceso (PP)	Tiempo	<i>ms</i>
	Corriente	<i>A</i>
	Voltaje	<i>V</i>
	Fuerza	<i>N</i>
Parámetros de respuesta (PR)	Penetración	μm
	Fuerza de desprendimiento	<i>N</i>

5.1 Materiales y equipo

Los materiales y equipos a utilizar son:

- Cables de cobre estañados.
- Máquina semi automática de soldadura.
- Electrodo superior e inferior de tungsteno.
- Probador de tensión MAV.

Equipo multidisciplinario involucrado en el proyecto:

- Operador certificado como experto en el proceso de soldadura.
- Inspector de calidad certificado como experto.
- Líder de entrenamiento.
- Ingeniero Especialista en el proceso de soldadura.
- Líder de segmento responsable de la línea.
- Ingeniero de Calidad.

La unión de soldadura que se va a estudiar está compuesta por dos cables de cobre estañado (Cu/Sn); uno está conformado por 28 filamentos con una sección transversal de 0.50mm^2 denominado “jacket cable” (Figura 15) nombrado en este proyecto como cable A, y el otro cable tiene 19 filamentos con una sección transversal de 0.35mm^2 denominado “sensor” (Figura 16)

nombrado en este proyecto como cable B; en las Tablas 5 y 6 se presentan los valores de diseño y sus características.

TABLA 5

Valores de diseño y características cable A (Fuente: Empresa Automotriz).

Conductor-Filamentos nom. [No.] x [mm]	Sección transversal nom. [mm ²]	Diámetro del conductor nom. [mm]	Espesor de pared nom. / min. [mm]	Diámetro del núcleo del cable [mm] ±
28 x 0.150	0.50	0.88	0.35 / 0.24	1.65 ± 0.05

Figura 15

Cable A “Jacket cable” (Fuente: Empresa Automotriz).

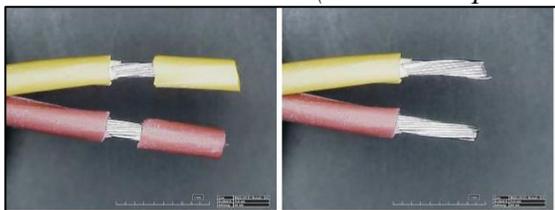


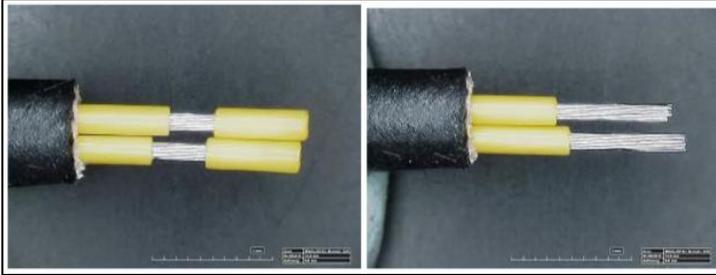
TABLA 6

Valores de diseño y características cable B (Fuente: Empresa Automotriz).

Conductor-Filamentos nom. [No.] x [mm]	Sección transversal nom. [mm ²]	Diámetro max. del conductor [mm]	Diámetro del conductor nom. [mm]	Espesor de pared nom. / min. [mm]	Diámetro exterior [mm]
19 x 0.160	0.35	0.90	0.88	0.25 / 0.20	1.30 ± 0.10

Figura 16

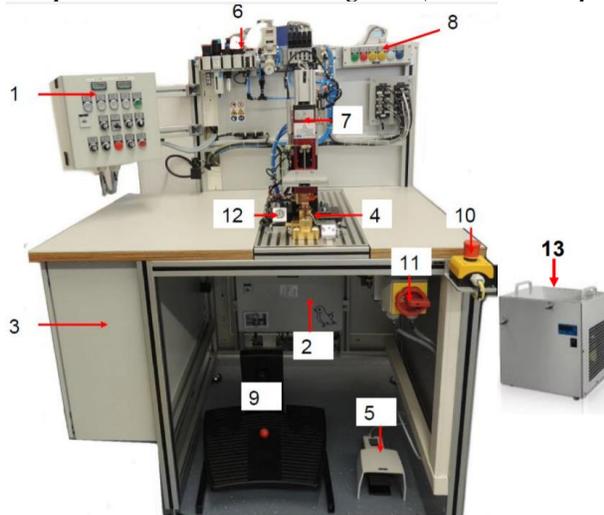
Cable B "Sensor" (Fuente: Empresa Automotriz).



Las probetas que se utilizarán en el estudio serán realizadas en la máquina de soldadura semi automática de nombre Lingl-08 (Figura 17), utilizando dos electrodos planos de tungsteno (WL); uno superior con diámetro $0.8 \times 5 \times 15.5 \text{ mm}$ con polaridad negativa (-) y otro inferior con diámetro $0.8 \times 5 \times 18.5 \text{ mm}$ con polaridad positiva (+). Los parámetros de la máquina se presentan en la Tabla 7.

Figura 17

Máquina de soldadura Lingl-08 (Fuente: Empresa Automotriz).



Para realizar la comprobación de los resultados se utilizará una máquina de prueba de tensión MAV (Figura 18), la cual mide la fuerza de unión de la soldadura. La fuerza mínima requerida es de 55 N y la prueba debe realizarse a una velocidad de 50 *mm/min*.

Figura 18

Máquina de tensión MAV (Fuente: Empresa Automotriz).



TABLA 7

Parámetros iniciales de soldadura (Fuente: Empresa Automotriz).

Parámetros de soldadura	Límite inferior	Valor ideal	Límite superior
Tiempo [ms]	80	200	220
Corriente [A]	1200	1500	1600
Voltaje [V]	1.3	1.75	2.9
Fuerza [N]	320	340	360
Penetración [μm]	200	210	270

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Caracterización del proceso de soldadura

Se estudió el proceso de soldadura realizando la caracterización del proceso. En la Figura 19 se presentan algunas de las piezas utilizadas para el estudio de caracterización obteniendo los resultados mostrados en la Figura 20. El proceso es aproximadamente normal presentado un Valor-P (P-Value) > 0.05 en la prueba de Shapiro-Wilk Test. Se observa que la tendencia central es $\bar{X} = 88.78 N$. La dispersión es $s = 3.39$.

Figura 19

Muestras de piezas de soldadura (Elaboración propia).

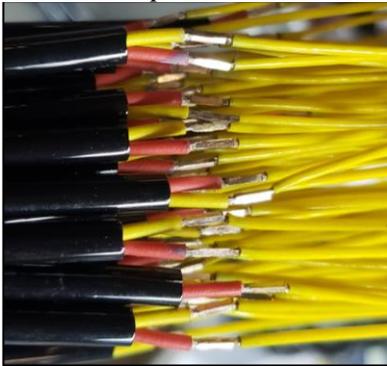
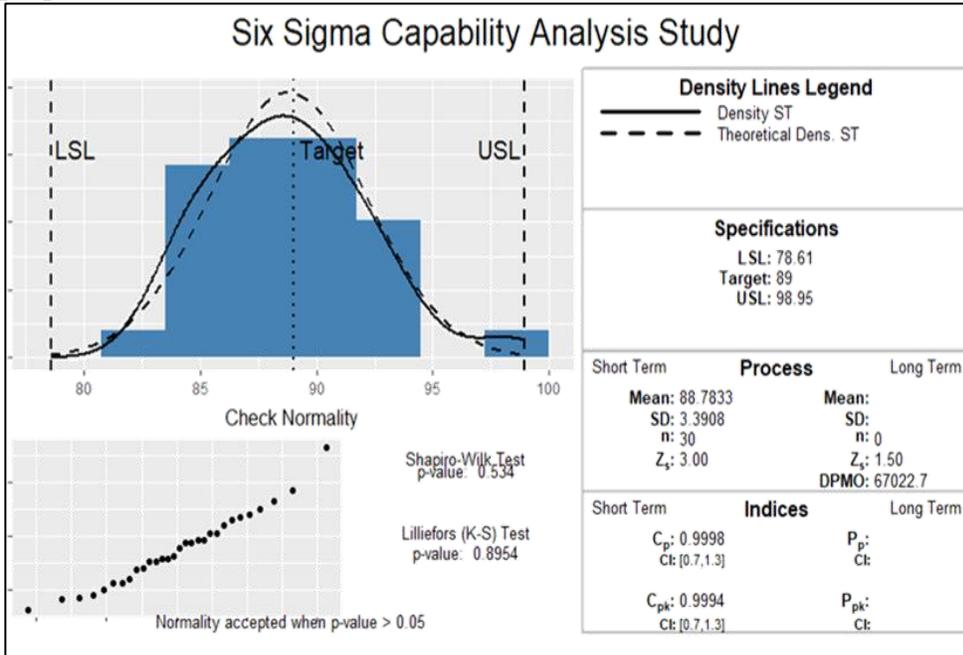


Figura 20

Estudio de caracterización de proceso de soldadura por resistencia (Fuente: Elaboración propia).



Las variables utilizadas en el estudio se muestran a continuación en la Tabla 8.

TABLA 8

Variables estudiadas en el proceso de soldadura por resistencia (Fuente: Elaboración propia).

Abreviatura	Parámetro / Variable	Unidad
RA	Tiempo de rampa ascendente	[ms]
t	Tiempo de soldadura	[ms]
RD	Tiempo de rampa descendente	[ms]
P	Potencia	[W]
F	Fuerza	[N]
PF	Resultados de prueba de fuerza de desprendimiento	[N]

Al observar que el proceso tiene un comportamiento aproximadamente normal en los datos se procede a utilizar el software R y por medio del algoritmo de Fedorov, que consiste en obtener un diseño de experimentos óptimo, se realiza la matriz experimental, agregando la variable de

respuesta que es el resultado de la prueba de desprendimiento que se muestra en la Tabla 9. El experimento generado tuvo una eficiencia de 100% con 18 corridas, las cuales fueron ejecutadas en la máquina Lingl 08 durante el primer turno de producción con el mismo operador. Posteriormente se les realizó la prueba destructiva de la resistencia de la fuerza de desprendimiento a tensión y se agregaron los valores a la matriz para ser analizados.

TABLA 9
Matriz de diseño óptimo de experimentos (Fuente: Elaboración propia).

Núm. de corrida	<i>Parámetros de entrada</i>					<i>Parámetro de salida</i>
	<i>RA</i> [ms]	<i>t</i> [ms]	<i>RD</i> [ms]	<i>P</i> [W]	<i>F</i> [N]	<i>PF</i> [N]
1	5	50	90	2000	50	57.10
2	25	200	10	3000	50	84.85
3	10	100	90	1000	250	33.55
4	10	50	120	3000	250	84.35
5	5	200	90	1000	400	44.50
6	25	100	120	2000	400	83.05
7	5	100	120	1000	50	47.10
8	10	200	120	2000	50	85.10
9	25	50	90	2000	250	85.55
10	5	100	10	3000	250	85.20
11	25	50	10	1000	400	0.10
12	10	200	90	3000	400	86.40
13	10	50	10	1000	50	23.80
14	25	100	90	3000	50	85.40
15	25	200	120	1000	250	85.90
16	5	200	10	2000	250	87.40
17	10	100	10	2000	400	84.40
18	5	50	120	3000	400	83.85

Durante el experimento se observó que había corridas que no presentaban defectos visuales y la

fuerza de tensión era baja en comparación con corridas que no cumplían con la calidad visual pero su fuerza de tensión era mayor. En las Figuras 21 a 26 se presentan algunos ejemplos de las piezas de las corridas realizadas.

Figura 21

Imagen de corrida 1 (Fuente: Elaboración Propia).

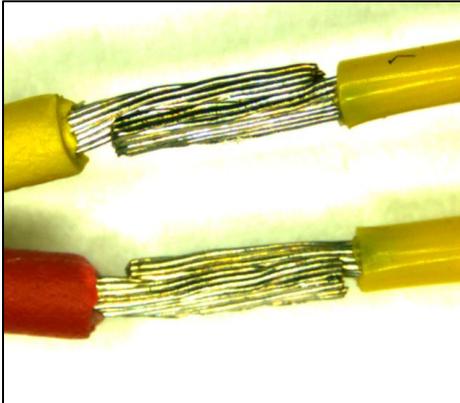


Figura 22

Imagen de corrida 2 (Fuente: Elaboración Propia).

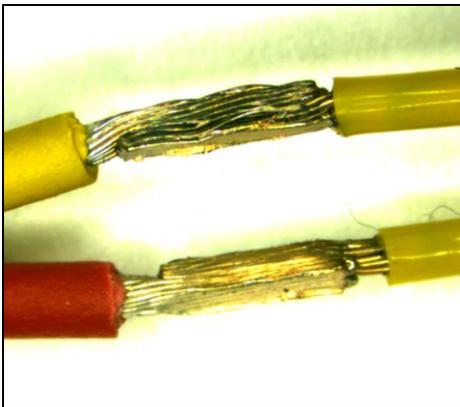


Figura 23

Imagen de corrida 3 (Fuente: Elaboración Propia).

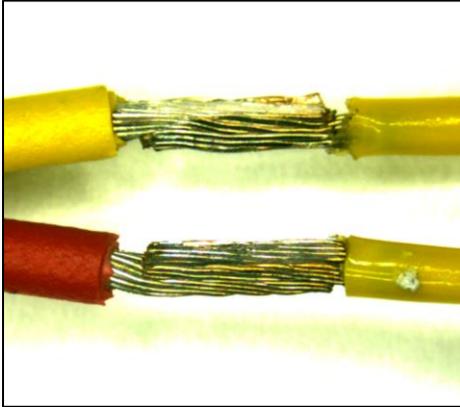


Figura 24

Imagen de corrida 4 (Fuente: Elaboración Propia).

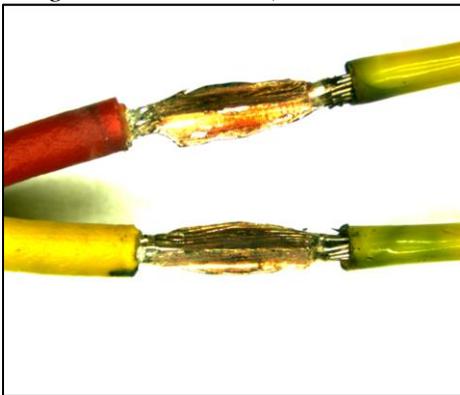


Figura 25

Imagen de corrida 5 (Fuente: Elaboración Propia).

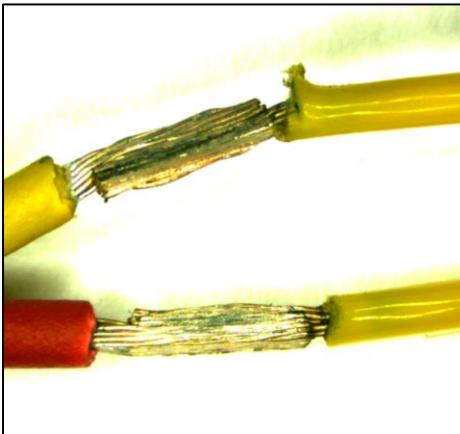


Figura 26

Imagen corrida 6 (Fuente: Elaboración propia).

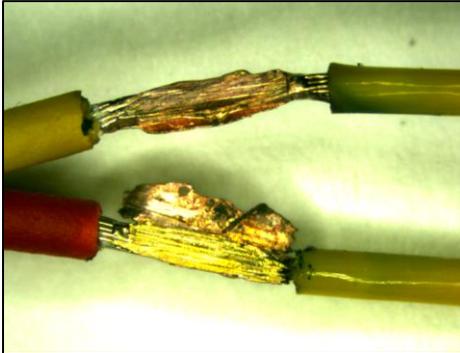
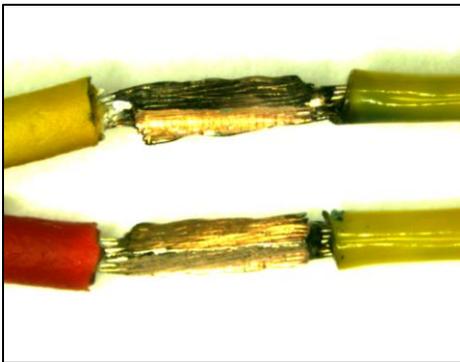


Figura 27

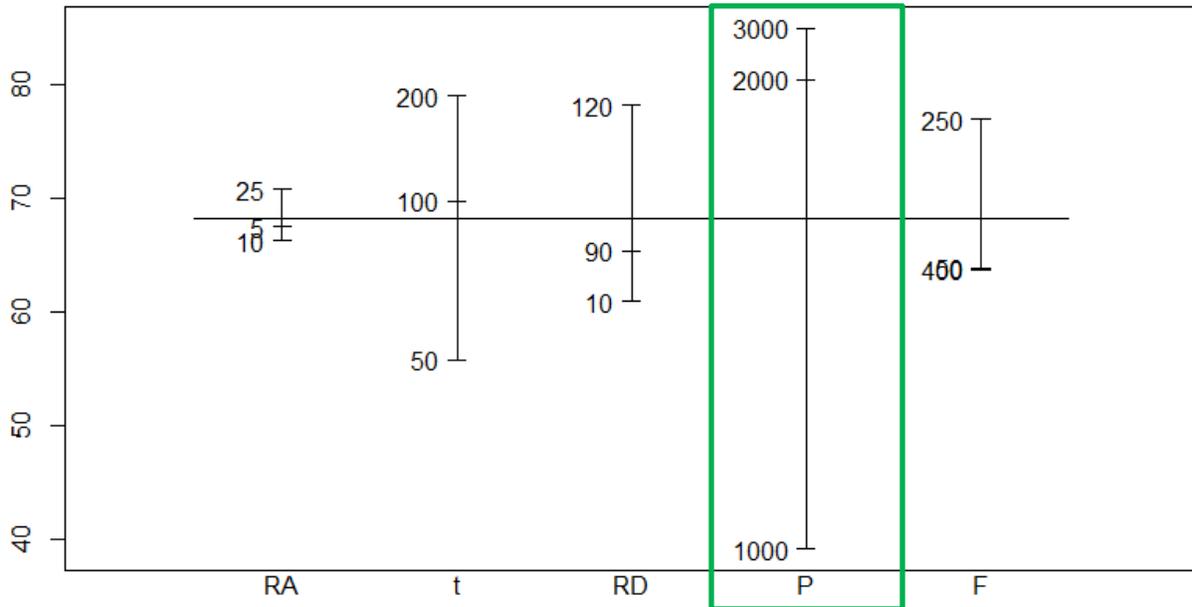
Imagen de corrida 11 (Fuente: Elaboración Propia).



Al realizar la gráfica de efectos principales se observó que la potencia es el factor más significativo como se muestra en color verde en la Figura 28.

Figura 28

Gráfica de efectos principales (Fuente: Elaboración Propia).



Para comprobar la información obtenida del gráfico de efectos principales se realiza el análisis de varianza, utilizando un nivel de significancia del 95%; este análisis se realizó utilizando nuevamente el software R. Se fueron discriminando los factores no significativos hasta tener el modelo, el cual se puede observar en la Tabla 13.

TABLA 10

Análisis de la varianza modelo 1 (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro de respuesta: Fuerza de desprendimiento (PF)					
	Df	Sum sq	Mean Sq	F Value	Pr (>F)
Tiempo de rampa ascendente	2	66.0	33.0	0.1687	0.848101
Tiempo de soldadura	2	1641.0	821.0	4.1979	0.063376
Tiempo de rampa descendente	2	964.1	482.1	2.4650	0.154738
Potencia	2	7653.6	3826.8	19.5680	0.001361**
Fuerza	2	695.7	347.9	1.7788	0.237338
Residuos	7	1368.9	195.6		

TABLA 11

Análisis de la varianza modelo 2 (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro de respuesta: Fuerza de desprendimiento (PF)					
	Df	Sum sq	Mean Sq	F Value	Pr (>F)
Tiempo de soldadura	2	1641.9	821.0	5.1492	0.0323036*
Tiempo de rampa descendente	2	964.1	482.1	3.0236	0.0989794
Potencia	2	7653.6	3826.8	24.0020	0.0002469***
Fuerza	2	695.7	347.9	2.1819	0.1688182
Residuos	9	1434.9	159.4		

TABLA 12

Análisis de la varianza modelo 3 (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro de respuesta: Fuerza de desprendimiento (PF)					
	Df	Sum sq	Mean Sq	F Value	Pr (>F)
Tiempo de soldadura	2	1641.9	821.0	4.2384	0.0431828*
Tiempo de rampa descendente	2	964.1	482.1	2.4888	0.1283366
Potencia	2	7653.6	3826.8	19.7566	0.0002285***
Residuos	11	2130.7	193.7		

TABLA 13

Análisis de la varianza modelo 4 (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro de respuesta: Fuerza de desprendimiento (PF)					
	Df	Sum sq	Mean Sq	F Value	Pr (>F)
Tiempo de soldadura	2	1641.9	821.0	3.4485	0.0628783*
Potencia	2	7653.6	3826.8	16.0748	0.000358***
Residuos	13	3094.8	238.1		

Una vez obtenido el modelo se procedió a realizar la regresión lineal. En la Tabla 14 se puede observar que el mejor coeficiente estimado es el parámetro con la Potencia en 3000 W. También se puede observar que el modelo es predictivo.

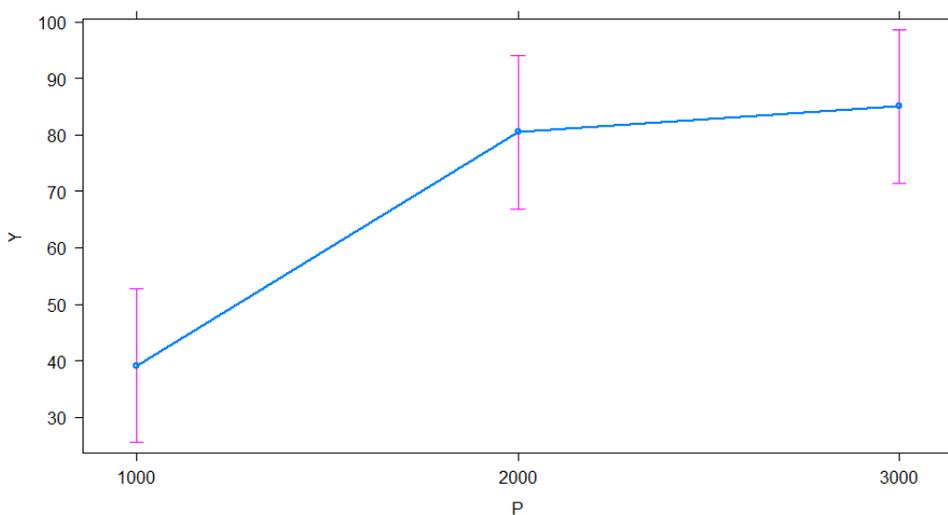
TABLA 14

Resumen de ANOVA (Fuente: Elaboración propia).

Coefficientes:				
	Estimate	Error	Valor-t	Pr (> t)
	Std.			
(Intercepción)	40.742	8.132	5.010	0.000239 ***
Tiempo 200	9.242	8.908	1.037	0.31.8439
Tiempo 50	-13.992	8.908	-1.571	0.140270
Potencia 2000	41.275	8.908	4.633	0.000468 ***
Potencia 3000	45.850	8.908	5.147	0.000188 ***

Error estándar residual: 15.43 en 10 grados de libertad
R-Cuadrada Múltiple: 0.7502, R-Cuadrada Ajustada: 0.6734
Estadístico F: 9.762 en 4 y 13 DF, Valor-P: 0.0007132

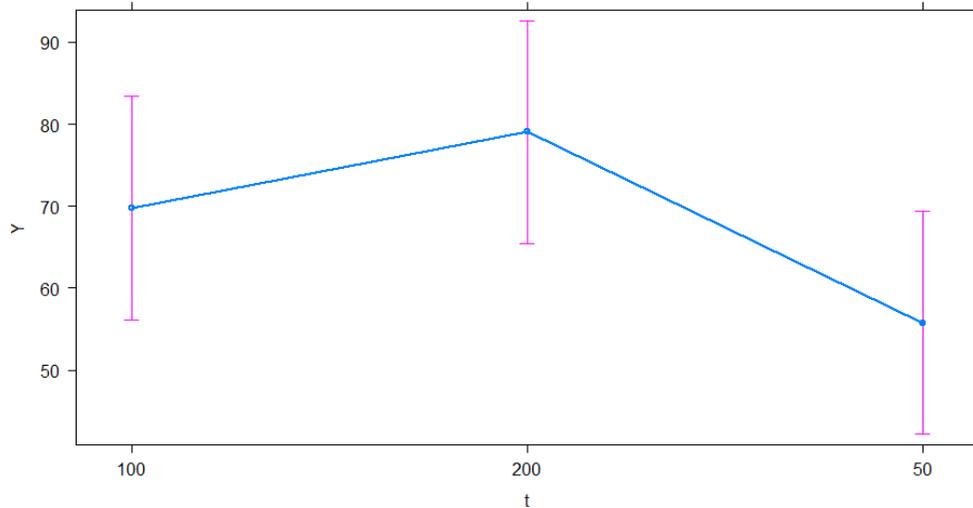
Al realizar el análisis de los efectos podemos observar gráficamente que se obtendrán los valores más altos del resultado de la resistencia a la fuerza de desprendimiento trabajando con una potencia de 3000 W, esto se representa en la Figura 29.

Figura 29*Gráfica de los efectos de la Potencia (Fuente: Elaboración Propia).*

En la Figura 30 podemos observar que para el caso del tiempo el mejor resultado de la resistencia a la fuerza de desprendimiento se encuentra aproximadamente en los 200 ms. Este punto es importante de verificar debido a que, si se incrementa el tiempo, también se incrementará el tiempo ciclo del proceso actual, lo cual puede generar que se fabrique una menor cantidad de piezas.

Figura 30

Gráfica de los efectos del tiempo (Fuente: Elaboración propia).



b. Parametrización del proceso de soldadura

El resultado a la resistencia de la fuerza de desprendimiento puede controlarse a un valor deseado controlando los valores de la potencia y el tiempo. Para realizar esto se debe de tomar en cuenta el resultado de las gráficas de los efectos principales del modelo lineal obtenido en el apartado anterior. También se realiza el cálculo por medio de la función “All effects” obteniendo los resultados que se muestran en Tabla 15. En dicha tabla se puede comprobar que los resultados más altos de resistencia a la fuerza de tensión se obtienen trabajando el equipo con un tiempo de 200 ms y una potencia de 3000 W.

TABLA 15

Efectos de la potencia y el tiempo en la resistencia a la fuerza de desprendimiento (Fuente: Elaboración propia).

tiempo	50 ms	100 ms	200 ms
	55.79 N	69.78 N	79.02 N
Potencia	1000 W	2000 W	3000W
	39.15 N	80.43 N	85.00 N

Debido a que los mejores resultados se encuentran en los extremos, se decide explorar en dónde se encontrará un resultado de resistencia a la fuerza de tensión de 85 N, tomando en cuenta que el valor mínimo esperado de acuerdo a las especificaciones de cliente es de 55 N. Por lo que se implementó una función de interpolación lineal simple por medio de la Ecuación 4 que se muestra a continuación.

$$\tilde{x} = \frac{\tilde{Y}(x_2 - x_1) + (y_2 \cdot x_1) - (y_2 \cdot x_2)}{y_2 - y_1} \quad (4)$$

c. Superficie de respuesta del proceso de soldadura

Al realizar el estudio de superficie de respuesta se obtiene la siguiente matriz experimental, representada en la Tabla 16.

Tabla 16

Matriz Experimental Superficie de Respuesta (Fuente: Elaboración propia).

Núm. de corrida	P [W]	t [ms]	PF [N]
1	1293.000	72.000	80.7
2	2707.000	72.000	86.5
3	1293.000	178.000	87.9
4	2707.000	178.000	86.9
5	2000.000	125.000	88.15

6	2000.000	125.000	87.3
7	2000.000	125.000	87.05

Los resultados se representaron gráficamente en la Figura 31 por medio de la una gráfica de contorno y en la Figura 32 por medio de una gráfica de superficie de perspectiva.

Figura 31

Representación gráfica de contorno del modelo (Fuente: Elaboración propia).

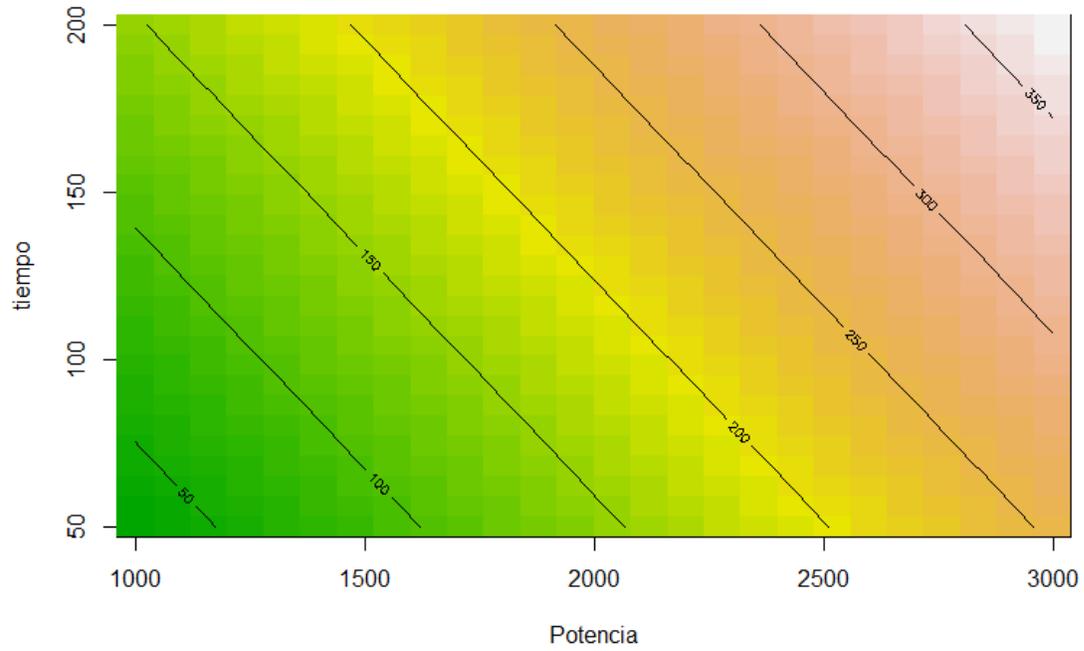
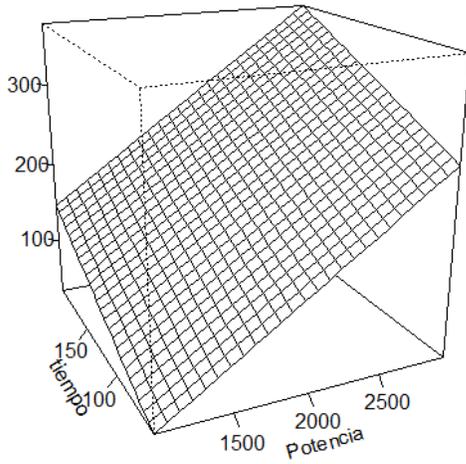


Figura 32

Gráfica de superficie de perspectiva (malla) (Fuente: Elaboración propia).



Los resultados de la matriz experimental se pueden observar en los ejemplos de las Figura 33 hasta la Figura 37. El resultado fue visualmente aceptable y la fuerza de desprendimiento fue estable.

Figura 33

Imagen corrida 1 Superficie de respuesta (Fuente: Elaboración propia).

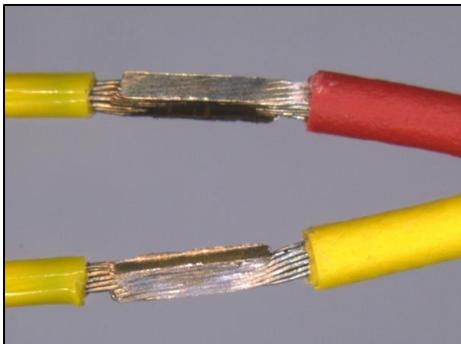


Figura 34

Imagen corrida 2 Superficie de respuesta (Fuente: Elaboración propia).

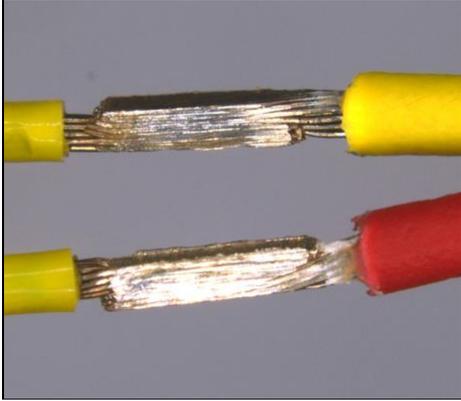


Figura 35

Imagen corrida 3 Superficie de respuesta (Fuente: Elaboración propia).

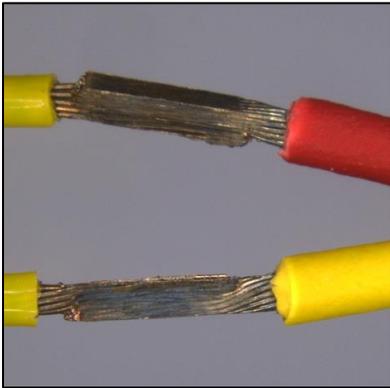


Figura 36

Imagen corrida 4 Superficie de respuesta (Fuente: Elaboración propia).

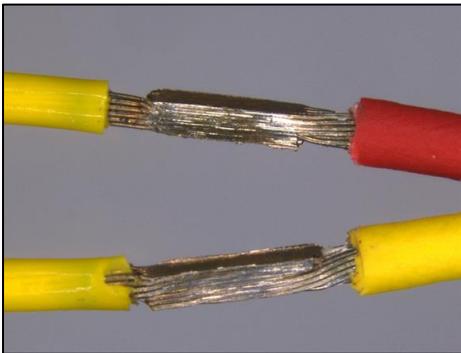
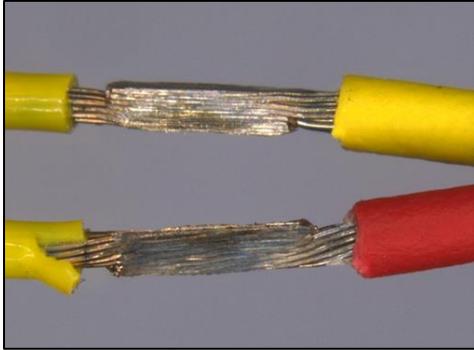


Figura 37

Imagen corrida 5 Superficie de respuesta (Fuente: Elaboración propia).



El proceso de soldadura fue monitoreado después de implementar la parametrización. Se observó un incremento en el CPK del proceso. Antes de la implementación del estudio el CPK se encontraba en 1.58 como se observa en la Figura 38. Después de la implementación el CPK subió a 1.78 representado en la Figura 39. Estos valores se tomaron del proceso y de las pruebas que se realizaron durante las corridas regulares de producción.

Figura 38
CPK antes de experimentación (Fuente: SAP).

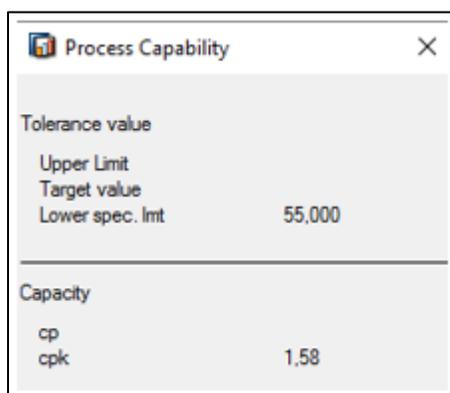


Figura 39
CPK después de experimentación (Fuente: SAP).

Process Capability	
Tolerance value	
Upper Limit	
Target value	
Lower spec. lmt	55,000
Capacity	
cp	
cpk	1,78

Después de la implementación del proyecto se realizó nuevamente el análisis de scrap de la línea de producción, utilizando la herramienta de Pareto. En la Tabla 17 se muestra los datos de scrap obtenidos durante el año 2022. De acuerdo a estos datos podemos observar que el porcentaje de scrap por error de máquina de soldadura se redujo en aproximadamente un 61% en comparación con el año 2021. De acuerdo a la gráfica de Pareto que se puede observar en la Figura 40 que el defecto de error de máquina de soldadura después de la optimización de los parámetros se redujo y cambio de posición en la tabla, siendo el tercer ofensor de scrap.

TABLA 17

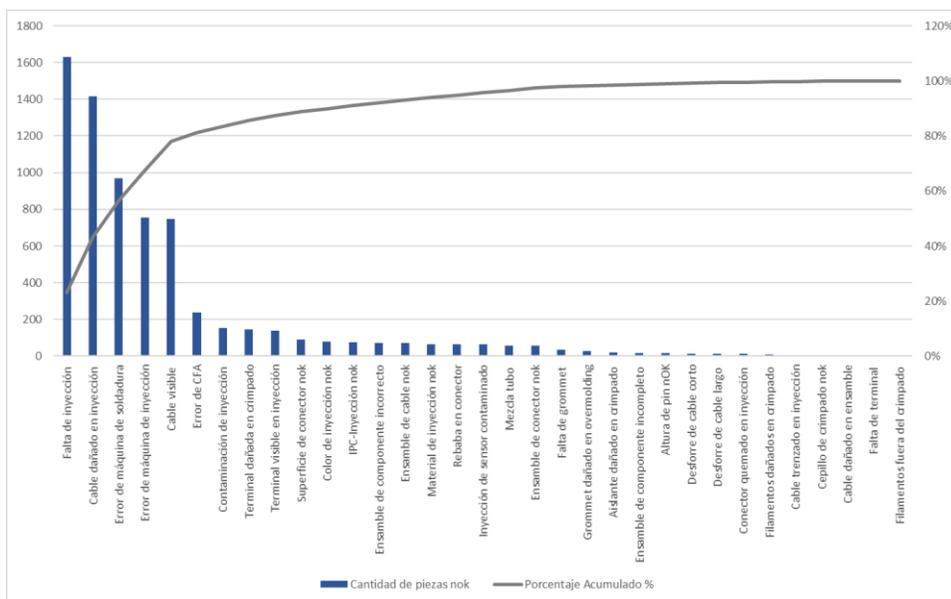
Tabla de defectos de línea de producción correspondientes al año (*Fuente: Elaboración propia*).

Descripción de la falla	Cantidad de piezas nok	Acumulado	Porcentaje %	Porcentaje Acumulado %
Falta de inyección	1630	1630	23%	23%
Cable dañado en inyección	1416	3,046	20%	43%
Error de máquina de soldadura	968	4,014	14%	57%
Error de máquina de inyección	755	4,769	11%	67%
Cable visible	749	5,518	11%	78%
Error de CFA	239	5,757	3%	81%
Contaminación de inyección	154	5,911	2%	83%
Terminal dañada en crimpado	147	6,058	2%	86%
Terminal visible en inyección	137	6,195	2%	87%
Superficie de conector nok	89	6,284	1%	89%
Color de inyección nok	81	6,365	1%	90%
IPC-Inyección nok	77	6,442	1%	91%
Ensamble de componente incorrecto	73	6,515	1%	92%

Ensamble de cable nok	71	6,586	1%	93%
Material de inyección nok	66	6,652	1%	94%
Rebaba en conector	65	6,717	1%	95%
Inyección de sensor contaminado	65	6,782	1%	96%
Mezcla tubo	57	6,839	1%	97%
Ensamble de conector nok	56	6,895	1%	97%
Falta de grommet	35	6,930	0%	98%
Grommet dañado en overmolding	26	6,956	0%	98%
Aislante dañado en crimpado	20	6,976	0%	99%
Ensamble de componente incompleto	17	6,993	0%	99%
Altura de pin nOK	17	7,010	0%	99%
Desforre de cable corto	14	7,024	0%	99%
Desforre de cable largo	12	7,036	0%	99%
Conector quemado en inyección	11	7,047	0%	100%
Filamentos dañados en crimpado	10	7,057	0%	100%
Cable trenzado en inyección	7	7,064	0%	100%
Cepillo de crimpado nok	6	7,070	0%	100%
Cable dañado en ensamble	5	7,075	0%	100%
Falta de terminal	5	7,080	0%	100%
Filamentos fuera del crimpado	2	7,082	0%	100%

Figura 40

Pareto de defectos de calidad en línea de producción 2022. (Fuente: Elaboración propia).



d. Análisis de Costo Beneficio

En la Tabla 18 se observa el resultado del análisis del costo beneficio obtenido por la optimización de los parámetros. Al reducir la cantidad de scrap se observa en términos de valor un ahorro proyectado a un año de aproximadamente \$711 326.00 MXN. Este análisis fue calculado de acuerdo al porcentaje de scrap y demandas de los años 2021 y 2022. El año 2021 fue la situación inicial y el año 2022 representa la situación futura.

Tabla 18

Tabla de análisis de Costo Beneficio (*Fuente: Elaboración propia*).

	Situación Inicial	Situación Futura
	2021	2022
Demanda Anual	2 101 800	1 639 900
% Scrap	16%	14%
Piezas defectuosas	294 252	229 586
Diferencia en Piezas	64 666 piezas	
Costo por pieza	\$11.00 MXN	
Ahorro	\$711 326.00 MXN	

7 CONCLUSIÓN

El experimento presentado en esta investigación se realizó utilizando un diseño óptimo de experimentos. Se utilizó el software R para determinar la matriz experimental utilizando el algoritmo de Fedorov. De los resultados anteriores se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La potencia es el factor más significativo utilizando un nivel de confianza del 95%.

La potencia y el tiempo son factores suficientes para garantizar valores de resistencia a la tracción superiores al valor mínimo de especificación exigido por el cliente.

Los valores de R-cuadrado y R-cuadrado ajustado son superiores al 80%, lo que indica que nuestro

modelo es un modelo predictivo. Con estos resultados podemos concluir que los parámetros son fundamentales para determinar la calidad de la soldadura. Principalmente el parámetro de la potencia garantizará que la soldadura esté correctamente unida. Sin embargo, se observa que también a mayor potencia las piezas presentaban quemaduras en el material por lo cual se encontraron los valores óptimos para evitar estas condiciones de calidad visual no aceptable.

La cantidad de piezas rechazadas en la estación de soldadura se disminuyó de 1591 a 968 después de la optimización de los parámetros. En términos de valor y proyectado en un año se calcula un ahorro de aproximadamente \$ 711 326.00 MXN.

Una de las limitaciones de esta investigación era obtener la disponibilidad de la máquina. Esta máquina se utiliza para la producción de arneses para automóviles, por lo que la experimentación debía ser precisa. Para obtener resultados representativos en la investigación y los diseños experimentales, es necesario asegurarse de que el proceso está bajo control, de lo contrario, los resultados obtenidos pueden generar un sesgo.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, F., Jannat, N. E., Gavidel, S. Z., Rickli, J., & Kim, K. Y. (2019). A conceptual framework for cyber-physical system in connected RSW weldability certification. *Procedia Manufacturing*, 38(2019), 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.055>
- Ahmed, F., & Kim, K. Y. (2017). Data-driven Weld Nugget Width Prediction with Decision Tree Algorithm. *Procedia Manufacturing*, 10, 1009–1019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.092>
- Akkas, N. (2017). Welding time effect on tensile-shear loading in resistance spot welding of SPA-H weathering steel sheets used in railway vehicles. *Acta Physica Polonica A*, 131(1), 52–54. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.52>
- Alexy, M., Kundrat, J., & Shannon, G. (2017). *Resistance Welding and Laser Welding for Electrical Contacting and Micro Joining Solutions*. 5. <https://doi.org/10.17729/ebis.2017.5/7>
- Amiri, N., Farrahi, G. H., Kashyzadeh, K. R., & Chizari, M. (2020). Applications of ultrasonic testing and machine learning methods to predict the static & fatigue behavior of spot-welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 52(January), 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.047>
- baghbani, M., Iranzadeh, S., & Bagherzadeh khajeh, M. (2019). Investigating the relationship between RPN parameters in fuzzy PFMEA and OEE in a sugar factory. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 60(May), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.05.003>
- Carrillo, J., & Hinojosa, R. (2016). Cableando el norte de México: la evolución de la industria maquiladora de arneses. *Región Y Sociedad*, 13(21). <https://doi.org/10.22198/rys.2001.21.a734>
- Chen, S., Sun, T., Jiang, X., Qi, J., & Zeng, R. (2016). Online monitoring and evaluation of the weld quality of resistance spot welded titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 23, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.003>
- Chiumenti, M., Cervera, M., Agelet de Saracibar, C., & Dialami, N. (2013). Numerical modeling of friction stir welding processes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 254, 353–369. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2012.09.013>
- Claro, L., Quesada, F., & Samir, E. (2015). *Proceso y tipos de soldadura para materiales metálicos y termoplásticos*. 1–7.
- Dialami, N., Chiumenti, M., Cervera, M., Segatori, A., & Osikowicz, W. (2017). Enhanced friction model for Friction Stir Welding (FSW) analysis: Simulation and experimental validation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 133, 555–567. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.022>
- Dobránszky, J., Nagy, P., & Kovács, T. (2012). *Developments in copper to copper micro-welding technologies*. 3.
- Garud, S. S., Karimi, I. A., & Kraft, M. (2017). Design of computer experiments: A review. *Computers and Chemical Engineering*, 106, 71–95. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.010>
- Gietzelt, T., Toth, V., Huell, A., & Dittmeyer, R. (2017). Determining the Dependence of Deformation during Diffusion Welding on the Aspect Ratio Using Samples Made of SS 304 (1.4301). *Advanced Engineering Materials*, 19(2), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adem.201600344>

- Gupta, B., Ducharme, B., Sebald, G., & Uchimoto, T. (2018). A Space Discretized Ferromagnetic Model for Non-Destructive Eddy Current Evaluation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 2018–2021. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2773517>
- Hamedi, M., & Atashparva, M. (2017). A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding. *Welding in the World*, 61(2), 269–290. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0419-4>
- Ii, T. (n.d.). *MANUAL DE*.
- Javadi, Y., Mohseni, E., MacLeod, C. N., Lines, D., Vasilev, M., Mineo, C., Foster, E., Pierce, S. G., & Gachagan, A. (2020). Continuous monitoring of an intentionally-manufactured crack using an automated welding and in-process inspection system. *Materials and Design*, 191, 108655. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108655>
- Javadi, Y., Sweeney, N. E., Mohseni, E., MacLeod, C. N., Lines, D., Vasilev, M., Qiu, Z., Vithanage, R. K. W., Mineo, C., Stratoudaki, T., Pierce, S. G., & Gachagan, A. (2020). In-process calibration of a non-destructive testing system used for in-process inspection of multi-pass welding. *Materials and Design*, 195, 108981. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108981>
- Jing, G. G. (2019). Solve Your FMEA Frustrations. *Lean & Six Sigma Review*, 18(February), 8–13.
- Juan, A., & Maturana, L. (n.d.). *Soldadura por arco manual o*. 1–30.
- Kalyan Kumar, R., & Omkumar, M. (2020). Ultrasonic welding of GF/PA6T composites: Experimental investigation and process optimization. *Materials Today: Proceedings*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.462>
- Khan, M. T. H., Ahmed, F., & Kim, K. Y. (2017). Weldability Knowledge Visualization of Resistance Spot Welded Assembly Design. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 1609–1616. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.308>
- Kim, K. Y., & Ahmed, F. (2018). Semantic weldability prediction with RSW quality dataset and knowledge construction. *Advanced Engineering Informatics*, 38(May), 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.05.006>
- Kim, T., Park, H., & Rhee, S. (2005). Optimization of welding parameters for resistance spot welding of TRIP steel with response surface methodology. *International Journal of Production Research*, 43(21), 4643–4657. <https://doi.org/10.1080/00207540500137365>
- Lee, S. R., Choo, Y. J., Lee, T. Y., Kim, M. H., & Choi, S. K. (2001). A quality assurance technique for resistance spot welding using a neuro-fuzzy algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 20(5), 320–328. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(01\)80051-0](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(01)80051-0)
- Li, G. F., Li, Y., Chen, C. H., He, J. L., Hou, T. W., & Chen, J. H. (2020). Advanced FMEA method based on interval 2-tuple linguistic variables and TOPSIS. *Quality Engineering*, 32(4), 653–662. <https://doi.org/10.1080/08982112.2019.1677913>
- Ling, S. F., Wan, L. X., Wong, Y. R., & Li, D. N. (2010). Input electrical impedance as quality monitoring signature for characterizing resistance spot welding. *NDT and E International*, 43(3), 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.11.003>
- Nee, A. Y. C. (2015). Handbook of manufacturing engineering and technology. *HandBook of Manufacturing Engineering and Technology*, 1–3487. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4>
- Olabi, A. G., Lorza, R. L., & Benyounis, K. Y. (2014). Quality Control in Welding Process. In *Comprehensive Materials Processing* (Vol. 6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00607-5>

- Ouafi, A. El, Bélanger, R., & Méthot, J. F. (2011). Artificial neural network-based resistance spot welding quality assessment system. *Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques*, 108(6), 343–355. <https://doi.org/10.1051/metal/2011066>
- Pereira, A. B., & De Melo, F. J. M. Q. (2020). Quality assessment and process management of welded joints in metal construction—A review. *Metals*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/met10010115>
- Principal, D., Presupuestario, I., Operacionales, G., Capital, B. De, Paterno, A., & Materno, A. (2006). *Universidad Austral de Chile*. 1–35.
- Pronzato, L. (2008). Optimal experimental design and some related control problems. *Automatica*, 44(2), 303–325. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.05.016>
- Ravichandran, P., Anbu, C., Meenakshipriya, B., & Sathiyavathi, S. (2020). Process parameter optimization and performance comparison of AISI 430 and AISI 1018 in resistance spot welding process. *Materials Today: Proceedings*, 33(xxxx), 3389–3393. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.197>
- Rosado, L. S., Santos, T. G., Piedade, M., Ramos, P. M., & Vilaça, P. (2010). Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 43(8), 1021–1030. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.02.006>
- Sathish, T., Dinesh Kumar, S., Muthukumar, K., & Karthick, S. (2020). Natural inspiration technique for the parameter optimization of A-GTAW welding of naval steel. *Materials Today: Proceedings*, 21(xxxx), 843–846. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.600>
- Senthil, S. M., Parameshwaran, R., Nathan, S. R., & Karthi, S. (2019). Non-Destructive Testing and Evaluation of Friction Stir Welded AA6063 Circularly Butted Pipes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 55(12), 957–966. <https://doi.org/10.1134/S1061830919120106>
- Seyfipour, M., Ghanei, S., Mazinani, M., Kashefi, M., & Davis, C. (2018). Nondestructive examination of recovery stage during annealing of a cold-rolled low-carbon steel using eddy current testing technique. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 33(2), 165–174. <https://doi.org/10.1080/10589759.2017.1409746>
- Srinivasan, V. P., Balamurugan, S., Balakarthish, B., Devva Darshan, S., & Dhanush Prabhu, A. B. (2020). Experimental investigation on ultrasonic metal welding of copper sheet with copper wire using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.100>
- Stavridis, J., Papacharalampopoulos, A., & Stavropoulos, P. (2018a). A cognitive approach for quality assessment in laser welding. *Procedia CIRP*, 72, 1542–1547. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.119>
- Stavridis, J., Papacharalampopoulos, A., & Stavropoulos, P. (2018b). *Quality assessment in laser welding : a critical review*. 1825–1847. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0461-4>
- Stavridis, J., Papacharalampopoulos, A., & Stavropoulos, P. (2018c). Quality assessment in laser welding: a critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5–8), 1825–1847. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0461-4>
- Summerville, C., Compston, P., & Doolan, M. (2019). A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques. *Procedia Manufacturing*, 29, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.142>
- Tabatabaeipour, M., Hettler, J., Delrue, S., & Van Den Abeele, K. (2016). Non-destructive ultrasonic examination of root defects in friction stir welded butt-joints. *NDT and E International*, 80, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.02.007>

- Trommnau, J., Kühnle, J., Siegert, J., Inderka, R., & Bauernhansl, T. (2019). Overview of the state of the art in the production process of automotive wire harnesses, current research and future trends. *Procedia CIRP*, *81*, 387–392. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.067>
- Vanaret, C., Seufert, P., Schwientek, J., Karpov, G., Ryzhakov, G., Oseledets, I., Asprion, N., & Bortz, M. (2021). Two-phase approaches to optimal model-based design of experiments: how many experiments and which ones? *Computers and Chemical Engineering*, *146*, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107218>
- Wang, X., Zhou, J., Yan, H., & Pang, C. K. (2017). *Quality monitoring of spot welding with advanced signal processing and data-driven techniques*. <https://doi.org/10.1177/0142331217700703>
- Williams, N. T., & Parker, J. D. (2004). Review of resistance spot welding of steel sheets: Part 2 - Factors influencing electrode life. *International Materials Reviews*, *49*(2), 77–108. <https://doi.org/10.1179/095066004225010541>
- Zappia, T. (2009). Inspection and quality control in friction stir welding. In *Friction Stir Welding: From Basics to Applications*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845697716.1.183>
- Zhou, K., & Cai, L. (2013). Online nugget diameter control system for resistance spot welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *68*(9–12), 2571–2588. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4886-0>
- Zhou, K., & Yao, P. (2019). Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *124*, 170–198. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.041>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. New York, Estados Unidos: Springer Publishing.
- O'Brien, R. L., American Welding Society, & American Welding Society. (1996). *Manual de soldadura (Vol. 2)*. Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos: Prentice Hall.
- Gil, H. (2007). *Soldadura*. Barcelona, España: Ceac.

ANEXOS

Anexo A

CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL PROCESO DE SOLDADURA

El personal de operación de la máquina de soldadura debe utilizar lentes de seguridad transparentes para protección facial, guantes y zapatos de seguridad; esto de acuerdo a lo presentado en la norma oficial mexicana NOM-027-stps-2008, *Actividades de soldadura y corte-condiciones de seguridad e higiene*, en el artículo 8 inciso c. También se debe de contar con un extintor tipo ABC de la capacidad acorde al análisis de riesgos potenciales, en un radio no mayor a 7 metros, en el área donde se desarrollen las actividades de soldadura.

Anexo B

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL EQUIPO DE SOLDADURA

Las características eléctricas y mecánicas de la máquina de soldadura, así como sus especificaciones, están regidas bajo la Norma ISO 669:2016 *Resistance welding equipment - Mechanical and electrical requirements*; en donde se describen las características eléctricas y mecánicas que se deben considerar en cada tipo de soldadura. Esta información es considerada desde el diseño y fabricación del equipo de soldadura.

Anexo C

DISPOSICIÓN DE MATERIAL NO CONFORME

Todo material no conforme es identificado con una etiqueta y cinta roja como evidencia de producto no conforme. El material no conforme se registra en una tarjeta de recolección de fallas para posteriormente realizar la captura en el sistema y disponerlo en el área de SCRAP. Esto con base en la Norma ISO 9001:2015 en el punto 8.7 “*Control de salidas no conformes*”. La disposición del SCRAP que contiene material de cobre se realiza con un proveedor externo para venta, ya que por las propiedades de este material puede ser reciclado y utilizado en otras compañías. La compañía que realiza la compra del material no conforme da como evidencia a “La empresa automotriz” un manifiesto en donde viene expresada la cantidad de material y la disposición que le dan al mismo.