



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Optimización del proceso de soldeo por ola mediante diseño de experimentos

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:
María Nataly Guerrero Cárdenas

Dirigido por:
Eric Huerta Manzanilla

MI. Eric Huerta Manzanilla
Presidente

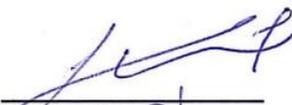
Dra. Aurora Femat Díaz
Secretario

MI. Javier García Pérez
Vocal

MC. Luis Lucia Mendoza
Suplente

MAP. Agustín Martínez Rodríguez
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Firma



Firma



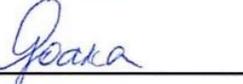
Firma



Firma



Firma



Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

RESUMEN

Para poder establecer una relación de mejora de un proceso es necesario saber cada una de las partes que la componen, así como conocer profundamente el impacto de cada una de sus variables, sin este conocimiento no es factible medir el efecto de una mejora.

El objetivo de este estudio es el planteamiento experimental para lograr una mejora significativa en el proceso de producción, conocido como soldeo por Ola.

El soldeo por ola es un proceso de unión intermetálica entre una tarjeta de circuitos impresos, componentes de montaje superficial y componentes *through hole*. Para poder realizar esta unión es importante conocer las variables que afectan cada uno de los subprocesos del soldeo por ola: Aplicación de Flux, precalentamiento y aplicación de soldadura. Para ello, se realizará un diseño experimental que permita cuantificar la significancia de las variables.

Este estudio expone una metodología diseñada para disminuir la cantidad de defectos, dónde se toman un total de cinco factores, cada factor con dos niveles, con un total de 8 corridas experimentales que tienen como propósito encontrar una receta que nos ayude a mejorar el proceso de soldeo por ola. De los resultados obtenidos se realiza un modelo por tipo de defecto, ya que al analizar cada defecto individual podremos llegar a identificar factores significativos para cada uno de ellos y los niveles adecuados para obtener una mejora significativa en la reducción de defectos en el soldeo.

Finalmente a través de una corrida de confirmación dónde se incluyan los factores y niveles correctos obtendremos que las conclusiones extraídas del análisis estadístico son concluyentes y ayudan a minimizar la cantidad de defectos.

Dentro de las conclusiones se observará que si se busca la mejora a un solo problema es posible que surja otro tipo de problema, de ahí la necesidad de balancear aquellos factores que resulten significativos sólo de esta manera los factores y niveles ayudarán a mejorar la situación.

(Palabras clave: soldeo por ola, variables, diseño experimental)

SUMMARY

In order to establish an improvement relationship in the process we have the necessity to know each part of it, to know deeply the impact for each variable, without this knowledge is not possible to measure the improvement effect.

The objective for this study is the experimental approach to achieve a significant improvement on production process called wave solder.

The wave solder is an intermetallic union process between a printed circuit board, surface mount components and through hole components. In order to perform this union it is important to know the variables that affect each sub process on wave solder; Flux application, preheat and solder application. For this, we will perform an experimental design that allows quantify the importance for the variables.

This work present a designed methodology to decrease the quantity of defects, here were taken 5 factors, each factor has two levels with 8 experimental runs in total that has the objective to find a recipe that helps to improve the wave solder process. According to the obtained results were make a model for each kind of defect, due to when each individual defect is analyzed we could identify significant factors for each one and the correct levels to obtain a significant improvement in the defects reduction on solder.

Finally through a confirmation run where the correct factors and levels were included will be ensured that the conclusions taken from statistical analysis were conclusive and this will help to minimize the quantity of defects.

In the conclusions will be observed that if the answer is to improve just one problem will be possible that appears another one, due to this, the necessity to balance those factors that appear as significant, just in this way the factors and levels will help to improve the situation.

(Key Words: wave solder, variables, experimental design)

A mis padres que día a día me han enseñado el sentido de responsabilidad y
Honestidad.

AGRADECIMIENTOS

De antemano agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por este tipo de programas que nos permiten como sociedad acceder de manera más sencilla al conocimiento a través de sus diferentes programas.

También a mis maestros que apoyaron en la realización de esta tesis, al maestro Eric por su apoyo como director de Tesis, a la maestra Aurora por su paciencia y aprendizaje recibido, al profesor Javier por su transferencia de conocimientos, al maestro Luis por su importante retroalimentación y al profesor Agustín por sus atinados comentarios hacia la mejora de mi trabajo. Sin todos ellos esto no sería posible.

Agradezco Infinitamente a mis Padres Guadalupe y Felipe que siempre me han apoyado y respetado en mis decisiones y a mis hermanas Aby, Montse y Mary que siempre han estado ahí a pesar de la distancia. Agradezco a Marco por su apoyo incondicional y soporte para lograr esta meta.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES.....	3
1.1.1	<i>Aplicación de Flux</i>	5
1.1.2	<i>Pre calentamiento</i>	8
1.1.3	<i>Soldeo por ola</i>	9
1.2	JUSTIFICACIÓN.....	18
2.	OBJETIVOS	19
2.1	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	19
2.2	HIPÓTESIS.....	20
2.3	OBJETIVOS.....	20
2.3.1	<i>Objetivo General</i>	20
2.3.2	<i>Objetivos Particulares</i>	20
2.4	IMPACTOS.....	21
3.	METODOLOGÍA	22
3.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	22
3.2	RECURSOS MATERIALES Y HUMANOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN.....	23
3.3	SISTEMA DE MEDICIÓN.....	26
3.4	LÍNEA BASE (ESTADO INICIAL).....	30
3.5	DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES.....	37
3.6	EXPERIMENTACIÓN.....	39
3.6.1	<i>Medición de la activación del flux</i>	39
3.6.2	<i>Definición de variables a considerar dentro de la experimentación</i>	41
3.6.3	<i>Definición e implementación de la metodología experimental a seguir</i>	43
3.6.4	<i>Realización de la experimentación</i>	45
3.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO (MODELO GENERAL).....	58
3.7.1	<i>Análisis de la significancia de los factores:</i>	59
3.7.2	<i>Análisis de coeficientes y significancia del modelo:</i>	61
3.7.3	<i>R² Y R²AJUSTADA :</i>	62
3.7.4	<i>Residuales:</i>	63
3.7.5	<i>Normalidad:</i>	64

3.7.6	<i>Gráficas de efectos:</i>	65
3.8	ANÁLISIS ESTADÍSTICO (MODELO POR DEFECTO DE CORTOS)	66
3.8.1	<i>Análisis de la significancia de los factores:</i>	67
3.8.2	<i>Análisis de coeficientes y significancia del modelo:</i>	68
3.8.3	R2 Y R2AJUSTADA :	70
3.8.4	<i>Gráficas de efectos:</i>	71
3.9	ANÁLISIS ESTADÍSTICO (MODELO POR DEFECTO DE FALTANTES DE SOLDADURA)	73
3.9.1	<i>Análisis de la significancia de los factores:</i>	73
3.9.2	<i>Análisis de coeficientes y significancia del modelo:</i>	74
3.9.3	R2 Y R2AJUSTADA:	76
3.9.4	<i>Gráficas de efectos:</i>	77
3.10	ANÁLISIS ESTADÍSTICO (MODELO POR DEFECTO DE FILETE INCORRECTO)	78
3.10.1	<i>Análisis de la significancia de los factores:</i>	78
3.10.2	<i>Análisis de coeficientes y significancia del modelo:</i>	79
3.10.3	R2 Y R2AJUSTADA:	81
3.10.4	<i>Gráficas de efectos:</i>	82
3.11	CORRIDA DE CONFIRMACIÓN (VALIDACIÓN DEL MODELO)	83
3.12	PROYECCIONES DE AHORROS ECONÓMICOS	85
3.13	PROPUESTA DE ESTANDARIZACIÓN	85
4.	RESULTADOS Y RECOMENDACIONES	87
4.1	RESULTADOS	87
5.	CONCLUSIONES	90
6.	REFERENCIAS	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Soldeo por Ola.	4
Figura 1.2 a) Ejemplo de migración electroquímica b) Ejemplo de corrosión causada por residuos de flux.	6
Figura 1.3. Secuencia de operación de una máquina de soldeo por ola.	7
Figura 1.4 PCBA Lado Top y PAD	8
Figura 1.5. Diagrama de fase eutéctico binario.	10
Figura 1.6. Tecnología a) TH y b) SMT.	11
Figura 1.7. Soldadura por ola de tarjeta.	12
Figura 1.8. Ejemplo <i>solder pallet</i>	12
Figura 1.9. Ángulos de mojado aceptables.	13
Figura 1.10 Perfilado del soldeo por ola.	17
Figura 3.1 Análisis de capacidad en la medición de la temperatura de tina (temperatura de pot).	26
Figura 3.2. Análisis de capacidad, cambio abrupto de en el comportamiento.	27
Figura 3.3. Análisis de Capacidad técnico 1.	28
Figura.3.4 Análisis de Capacidad Técnico 2.	29
Figura 3.5. Pareto de cantidad de defectos por línea.	31
Figura 3.6. Gráfico de PPMs por producto.	31
Figura 3.7. Cantidad de Fallas Soldeo por Ola.	33
Figura 3.8 Pareto de defectos reportados durante el año 2016.	34
Figura 3.9 Desglose de principales costos 2016.	35

Figura 3.10. Gráfico de pastel del total de costos en área de soldeo por ola 2016.	37
Figura 3.11 Definición de variables del proceso.....	38
Figura 3.12 Perfil de temperatura que indica activación correcta de flux.	40
Figura 3.13. Diagrama de Ishikawa, cortos circuitos.	42
Figura 3.14 Tarjeta electrónica a utilizar dentro de la experimentación.	45
Figura 3.15 Modelo General.....	58
Figura 3.16. Gráfico de Residuales vs Valores ajustados.	63
Figura 3.17. Gráfico de Normalidad.	64
Figura 3.18. Gráfico de todos los efectos Modelo General.	65
Figura 3.19. Modelo para el defecto de cortos.	66
Figura 3.20. Gráfico de todos los efectos Modelo para el defecto de cortos.....	71
Figura 3.21. Gráfico Factor C en Modelo para el defecto de cortos.	72
Figura 3.22. Modelo para el defecto de faltantes de soldadura.....	73
Figura 3.23. Gráfica de efectos Factor A para de faltantes de soldadura.	77
Figura 3.24. Gráfica de efectos Factor D para de faltantes de soldadura.	77
Figura 3.25. Modelo para el defecto de filete incorrecto.....	78
Figura 3.26. Gráfico de todos los efectos para Modelo de defecto de filete incorrecto.	82
Figura 3.27. Ejemplo de documentación de potenciales modos de falla en amef.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1	Resumen No-clean fluxes en soldeo por ola..	5
Tabla 1. 2	Resumen de parámetros utilizados.	14
Tabla 1. 3	Resumen de parámetros utilizados.	15
Tabla 1. 4	Resumen de parámetros utilizados.	15
Tabla 1. 5	Elementos contaminantes y su efecto el proceso de soldeo..	18
Tabla 3. 1	Descripción de recursos material necesarios.	24
Tabla 3. 2	Descripción de recursos humanos necesarios..	25
Tabla 3. 3	Top 3 de defectos por producto.....	32
Tabla 3. 4	Cantidad de Fallas Soldeo por Ola.....	33
Tabla 3. 5	Total de costos en área de soldeo por ola 2016.....	36
Tabla 3. 6	Variables para experimentación.	41
Tabla 3. 7	Propuesta experimental.....	44
Tabla 3. 8	Propuesta experimental optimizada con Federov.	44
Tabla 3. 9	Resultados experimentales.	50
Tabla 3. 10	Resultados de Corte pieza 4	53
Tabla 3. 11	Resultados de Corte pieza 6.	55
Tabla 3. 12	Resultados de Corte pieza 8.	57
Tabla 3. 13	Diseño optimizado con la variable de respuesta..	58
Tabla 3. 14	Niveles recomendados para cada factor	83
Tabla 3. 15	Resultados corrida de confirmación. Fuente: Propia.....	84

Tabla 4. 1 Niveles de factores recomendados. Fuente: propia. 89

1. INTRODUCCIÓN

Una tarjeta electrónica es el eje principal de funcionamiento de diferentes dispositivos militares, industriales y domésticos. Algunos ejemplos de uso doméstico que hoy en día dependen de ella son: lavadoras, secadoras, hornos, estufas entre otros, ya que a través de su circuitería permite que las funciones del dispositivo se ejecuten conforme a la intención de diseño. Un incorrecto soldeo entre la tarjeta y sus componentes provoca una inadecuada conexión eléctrica, dando como resultado que la respuesta o la función esperada no se ejecute de manera correcta.

En la industria electrónica el proceso comúnmente utilizado para la unión de componentes electrónicos a la tarjeta es el soldeo por ola, en el cual se involucran varios parámetros que se interrelacionan para que los componentes se unan a la tarjeta por medio de la soldadura.

En el estado de Querétaro se encuentra una empresa de manufactura dedicada al ensamble de tarjetas electrónicas, en donde es utilizado el proceso de soldeo por ola. Este tipo de soldeo es usado de igual manera por plantas hermanas de esta empresa, plantas ubicadas en Alemania, Polonia y China.

Actualmente en la planta del estado de Querétaro se ha ubicado un área de oportunidad en el proceso de soldeo por ola, ya que durante el proceso de soldeo se están generando defectos en las tarjetas, los defectos resultantes son regularmente cortos circuitos, excesos, faltantes de soldadura entre otros. Esta serie de defectos están fuertemente relacionados con los parámetros que son asignados a la máquina. Al día de hoy, la empresa tiene un aproximado de 10,000 ppms mensuales de tarjetas defectuosas en el área de soldeo, es decir, un aproximado de 4,000 unidades mensuales son re-trabajadas por causas asociadas a problemas de soldadura.

El presente trabajo tiene como objetivo la mejora del rendimiento del proceso de soldeo, mediante la búsqueda de aquellos parámetros que sean significativos para el mismo, así como la definición de una metodología que permita un ajuste adecuado del proceso, que en lo subsecuente se hará referencia a éste como *set-up* del proceso, es por ello que se usa como punto de partida algunos experimentos que otros autores han desarrollado con el fin de la mejora del rendimiento del proceso para definir aquellas variables que actuarán dentro de la experimentación. La salida de esta investigación servirá como punto de partida para diseñar un experimento óptimo para ejecutarlo dentro del proceso de soldeo por ola.

1.1 ANTECEDENTES

La palabra soldeo viene del antiguo francés, *soudure*, que en latín se conoce como *solidare*, que significa unión rápida. Esta palabra puede ser también definida como una técnica de unión metalúrgica usando soldadura (Mhd Noor, Mhd Nasir, & Idris, 2016). El término ola se refiere al método para conseguir esta unión.

El soldeo por ola consiste en hacer pasar ensambles de tarjetas de circuitos impresos, denominadas en la industria electrónica como PCBA (Printed Circuit Board Assembly) sobre un baño de soldadura fundida en la que éstas se elevan formando uniones en la tarjeta por el principio de acción capilar. La acción capilar es la capacidad de un líquido de fluir por espacios estrechos de manera natural (Mulugeta & Guna, 2000). Los componentes a ensamblar en una tarjeta utilizando el método de soldeo por ola son los denominados “through hole” que significa que atraviesan la tarjeta.

El proceso de soldeo por ola se divide en 3 subprocesos principales, los cuales interactúan para lograr el soldeo de los componentes a la tarjeta (Strauss, 1998). Estos subprocesos son: aplicación de flux¹, precalentado y en sí mismo el soldeo a través de la ola, como se observa en la Figura 1.1.

¹ *Flux*: Es un compuesto activo físico y químico que cuando es calentado remueve la capa de oxidación de una superficie metálica y protege las superficies de una re oxidación durante el proceso de soldeo, J-STD-0068

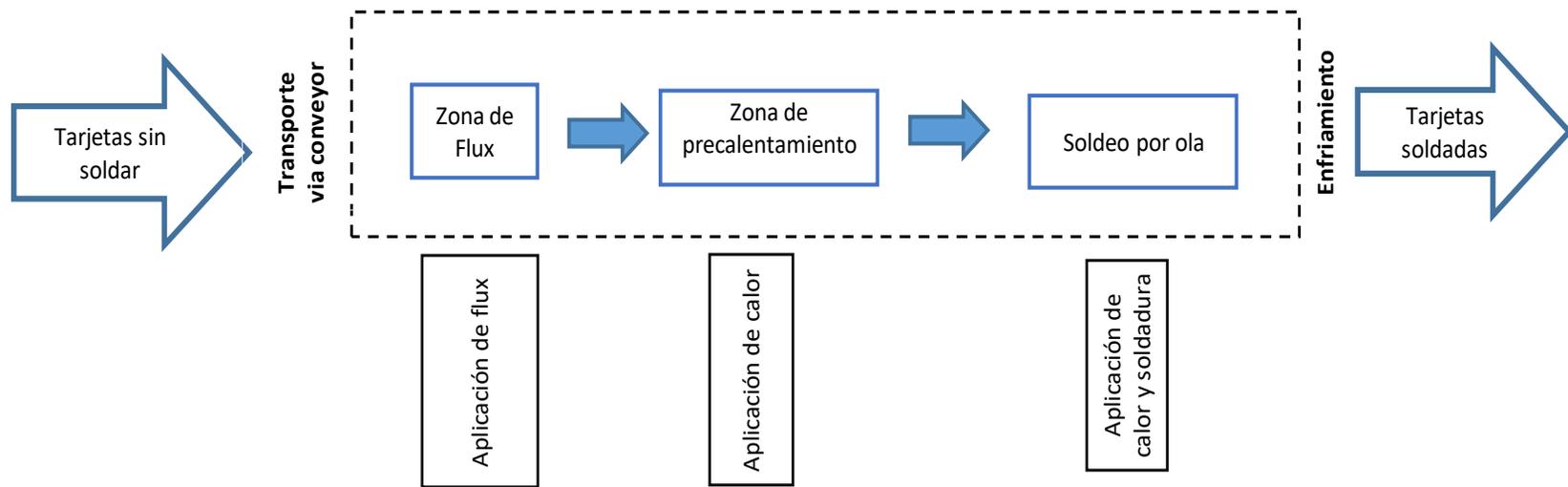


Figura 1.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Soldeo por Ola. Fuente: Elaboración propia.

1.1.1 Aplicación de Flux

Existen dos clasificaciones comunes de flux, uno de ellos es el *clean* y el otro es el *no clean*. Generalmente el flux *no clean* es el más utilizado en la producción de PCBAs (Ensamble de tarjetas de circuitos impresos). De acuerdo a Vadimas y colaboradores la química de flux para soldeo es diseñada para activar la superficie de la tarjeta, removiendo óxidos metálicos originalmente presentes en la superficie de soldeo. El activador que se encuentra en el flux *no clean* contiene menos activadores corrosivos que un flux lavable (Vadimas Verdingovas, Stendahl Jellesen, & Ambat, 2015). En la tabla 1.1 se puede observar los diferentes *Fluxes* denominados *no clean*.

Flux	Solvente	Designación J-STD-004 ^{IPC}	No. Ácido (mg KOH/g)	Contenido Solidos (%wt/wt)	Constitución WOA
F1	VOC	ROL1	21.6	5	Succínico
F2	VOC	ORL0	17.5	2.2	Succínico
F3	VOC	ORL0	26	4	Succínico y Adípico
F4	VOC	REL0	15.8	2.2	Adípico
F5	VOC	ORL0	14.7	2	Adípico
F6	VOC	ROL0	20.3	7.1	Palmitico
F7	Water	ORM0	36.85	4	Glutárico

Notas: *Las primeras 2 letras especifican el tipo de cubierta de película: RO=rosina, RE=resina, OR=Orgánica; la tercera letra especifica el nivel de activación en el flux: L=bajo, M=medio; y la última letra especifica el contenido de haluro: 0 - (<0.05% wt/wt) and 1 - (>0.5-2% wt/wt)

Tabla 1. 1 Resumen No-clean fluxes en soldeo por ola. Fuente: Traducida de Vadimas, Morten, & Jellesen, 2015.

Un activador común dentro del Flux son los ácidos orgánicos débiles por sus siglas en ingles *WOAs*², que al entrar en contacto con altas temperaturas en el precalentamiento se evaporaran, pero esto no quiere decir que la PCBA queda libre de residuos. De acuerdo a Conseil y colaboradores (Conseil, Stendahl Jellesen, & Ambat, 2014) , los activadores que generalmente se encuentran en el *flux no clean* son ácidos di-carboxílicos tales como el ácido adípico, succínico y málico; éstos dejan residuos iónicos sobre la PCBA y son de naturaleza higroscópica, es decir, absorben humedad del ambiente. La combinación de humedad con residuos iónicos ayuda a la formación de un electrolito que provee las condiciones adecuadas para que ocurra una migración electroquímica que puede causar fugas de corriente o cortos circuitos, y puede de igual manera acelerar el proceso de corrosión (V. Verdingovas, Jellesen, & Ambat, 2013). En la figura 1.2 se pueden observar ejemplos de migración electroquímica (a) y corrosión (b).

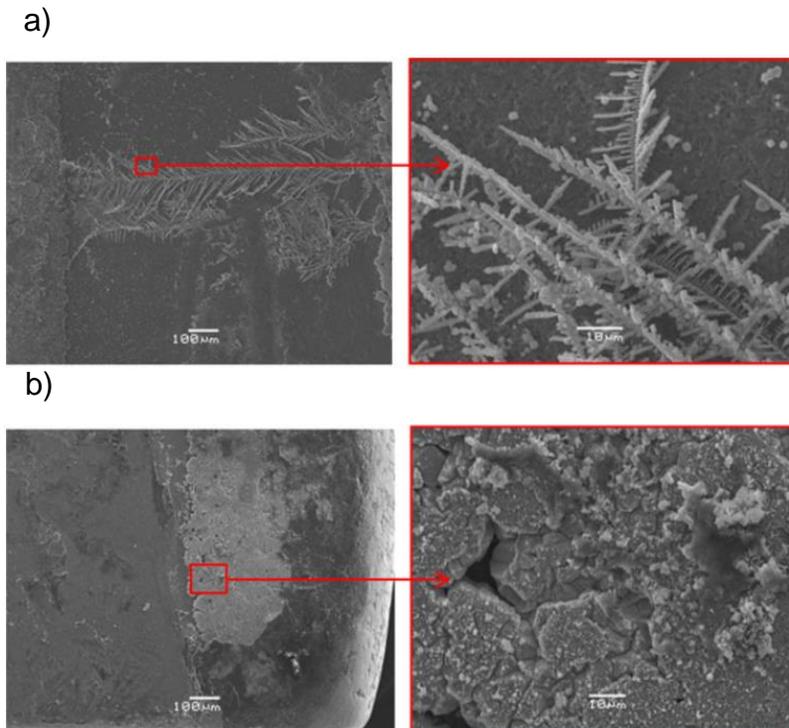


Figura 1.2 a) Ejemplo de migración electroquímica b) Ejemplo de corrosión causada por residuos de flux. Fuente: Verdingovas, Jellesen, & Ambat, 2013.

² *WOAs*: Weak Organic Acids

La cantidad de residuos de *flux* que presentan las tarjetas está asociado directamente con el tipo de proceso de soldeo y sus parámetros. En un proceso de soldadura por ola generalmente se usa un proceso de rociado, que si éste no es optimizado correctamente puede ser la causa de altos niveles de residuos. (Ver figura 1.3).

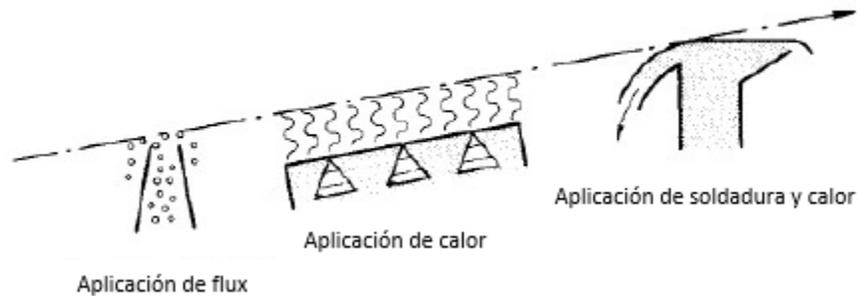


Figura 1.3. Secuencia de operación de una máquina de soldeo por ola. Fuente Strauss ,1998.

Para lograr que estos residuos sean minimizados es necesario aplicar la cantidad adecuada de flux y su proporcional de calor sobre la tarjeta para lograr que los WOAs se activen y se evaporen. Para ello, como se había comentado se necesita pasar por el proceso de precalentamiento.

1.1.2 Precalentamiento

El precalentamiento puede ser entendido de acuerdo al Instituto de circuitos impresos³ (IPC) como el requerimiento necesario para disminuir los residuos (solventes volátiles) antes de exponerlos a la soldadura fundida, con el propósito de disminuir un choque térmico de componentes y circuitos impresos. De acuerdo a Arra y colaboradores (Arra, Shangguan, Yi, Thalhammer, & Fockenberger, 2002) en estudios tempranos han demostrado que un precalentamiento correcto es crucial para que la soldadura fluya dentro de los orificios de la tarjeta y se obtenga un mojado correcto en lado de arriba de ésta (*top side*), como consecuencia de una correcta unión entre la tierra (*land*), también conocida como *pad*⁴ y la soldadura. Ver figura 1.4.

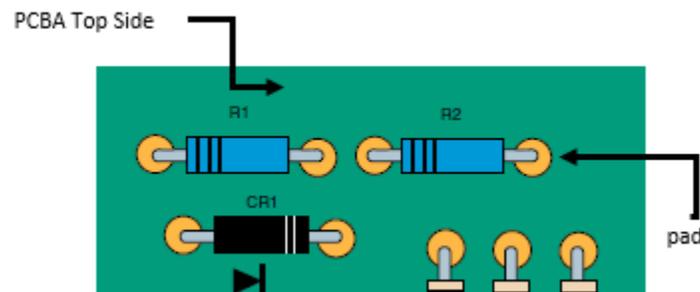


Figura 1.4 PCBA Lado Top y PAD, Fuente: IPC-A610, 2010.

Podemos concluir que el precalentamiento tiene 2 funciones primarias; 1) Incrementar la temperatura en la tarjeta para disminuir un choque térmico y 2) lograr la activación del flux. Si se tiene un pobre calentamiento la activación del flux no se logra y por consecuencia no hay un buen mojado. El mojado conocido en la industria electrónica como *Wetting* es una habilidad para crear una ininterrumpida capa de

³ <http://www.ipc.org/ContentPage.aspx?pageid=IPC-History>

⁴ *Pad*: Una porción de un patrón conductor usualmente usado para la conexión y/o el ensamble de componentes.

material de soldadura sobre una superficie cuando ésta entra en contacto con la soldadura fundida (Dusek, Szendiuch, Bulva, & Zelinka, 2016). Por otra parte, si se tiene un exceso de precalentamiento causará que el flux tenga una degradación térmica con lo que se formarán recubrimientos de aspecto carbonizado. La correcta selección de los parámetros de precalentamiento (tiempo y temperatura) optimizará el comportamiento del flux y minimizará los defectos del mojado (Wu, Yu, Law, & Wang, 2004).

De acuerdo a la guía de IPC-7530 para definir los límites de precalentamiento es importante revisar las especificaciones de los proveedores de la soldadura y flux, esto es una característica importante. De acuerdo a la experimentación llevada a cabo por Arra y colaboradores se sabe que generalmente esta temperatura de precalentamiento se encuentra entre 100 y 120°C (Arra et al., 2002).

1.1.3 Soldeo por ola

La unión de soldadura puede ser entendida como la reacción entre los componentes metálicos que serán unidos y la mezcla eutéctica⁵ generalmente de estaño-cobre (Cu-Sn) si la soldadura es libre de plomo, o la unión de estaño-plomo (Sn-Pb) si la soldadura no es libre de plomo.

Si se enfría una mezcla líquida de dos componentes (A y B), con temperatura de fusión diferente, esta mezcla tenderá a precipitarse a estado sólido a una temperatura determinada que corresponde al punto de solidificación. En esta temperatura existe una fase sólida y otra líquida. Para la mezcla líquida existe una temperatura de solidificación en la que dicha mezcla se encuentra en equilibrio con la fase sólida, cómo se muestra en la figura 4 de este documento.

⁵ Mezcla eutéctica: se refiere a la unión de dos o más sólidos en la cual el punto de fusión es el más bajo posible y todos sus constituyentes se cristalizan simultáneamente a partir del líquido.

Las curvas A+L y L+B representan las condiciones de temperatura bajo las cuales A y B están en equilibrio con A sólido o con B sólido respectivamente. En el punto E ambos sólidos están en equilibrio con la mezcla líquida. Sólo existe una temperatura, a una presión determinada, en la que la fase líquida puede estar en equilibrio con ambos sólidos. El punto E representa la temperatura más baja a la que congela cualquier mezcla líquida de A y B, y por lo tanto el punto de fusión más bajo de cualquier mezcla de A y B sólidos. A este punto se le denomina punto eutéctico. Ver figura 1.5

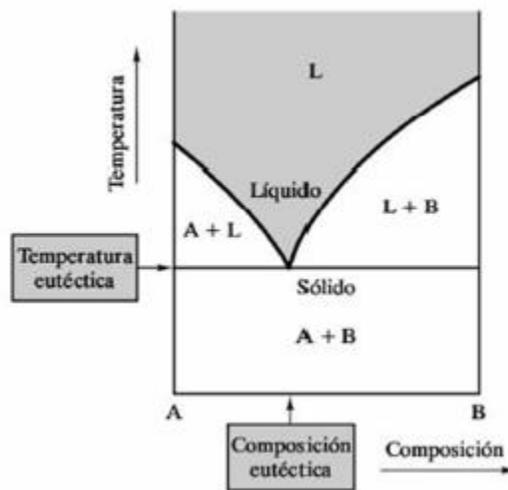


Figura 1.5. Diagrama de fase eutéctico binario. Fuente: F. Shackelford, 2005.

La soldadura utilizada hoy en día es libre de plomo, ya que a partir del desarrollo de legislaciones del medio ambiente como la restricción de sustancias peligrosas (RoHS) que entró en vigor en 2003 se determinó la salida del mercado de la soldadura con plomo debido al daño que causa tanto en seres humanos como al medio ambiente. La soldadura libre de plomo tiene regularmente puntos de fusión más alto que la soldadura con plomo. Mientras que la soldadura con plomo suele fundirse alrededor de los 180°C la soldadura libre de plomo está arriba de los 200°C (Harrison, Vincent, & Steen, 2001).

Cuando la intención es ensamblar componentes a una tarjeta electrónica podemos definir que existen 2 tipos de componentes que se pueden montar, los que ya hemos mencionado que son los componentes *through hole* (TH) y por otra parte los componentes de montaje superficial conocidos por su nombre en inglés como *Surface Mount Technology* (SMT), ver figura 1.6. Cuando se realiza un ensamblaje electrónico puede o no contener ambos tipos de componentes.

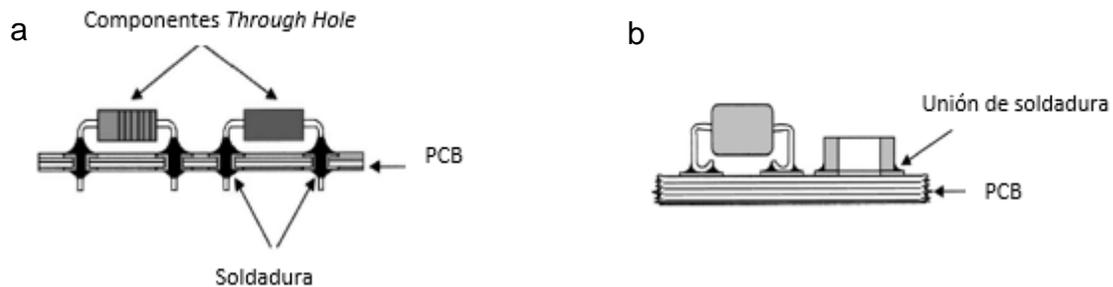


Figura 1.6. Tecnología a) TH y b) SMT. Fuente Abtew, 2000.

Una vez que las tarjetas ya han pasado tanto por la aplicación de flux como por precalentamiento, la siguiente etapa es pasar las tarjetas sobre la fuente de soldadura. En la figura 1.7 se puede observar cómo la soldadura permanece en una tina donde ésta se convierte de estado sólido a líquido. La soldadura es elevada generando olas, que al entrar en contacto con la tarjeta forma las uniones de soldadura por medio de la acción capilar.

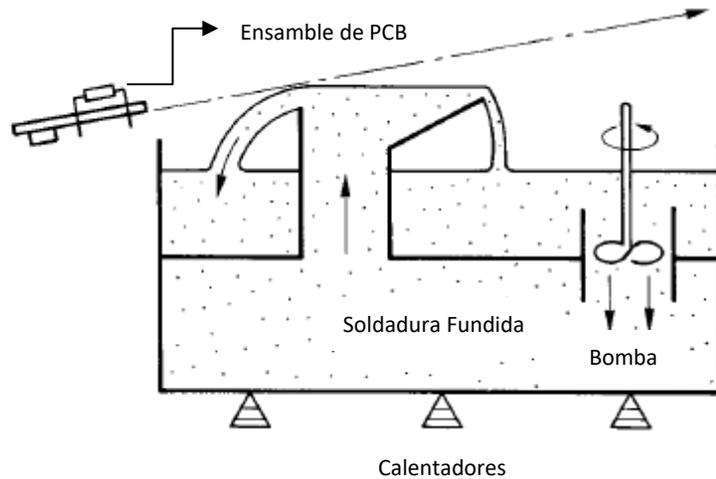


Figura 1.7. Soldadura por ola de tarjeta. Fuente: Strauss, 1998.

Generalmente cuando una tarjeta entra al soldeo por ola, ésta ya trae consigo componentes de tecnología de montaje superficial. Para proteger a estos componentes al momento de hacerlos pasar por el soldeo por ola se utilizan unos equipos llamados coloquialmente “*solder pallets*”, estos *solder pallets* tienen 2 funciones básicas; 1) transportar las tarjetas con componentes “*through hole*” al área de soldeo por ola y 2) proteger los componentes SMT. Ver figura 1.8.

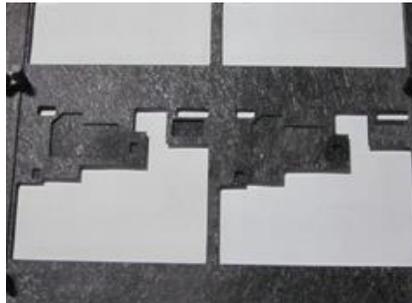


Figura 1.8. Ejemplo *solder pallet*. Fuente: Elaboración propia.

1.1.3.1 Condiciones de aceptación y rechazo de soldeo

De acuerdo al IPC A610 para aceptabilidad de ensamblajes electrónicos, para que una conexión de soldadura sea considerada aceptable debe mostrar evidencia de mojado y adherencia dónde la soldadura se une a la superficie soldada. El ángulo de mojado de la conexión no debe ser más grande que 90° (A,B). Como punto permisible el ángulo de mojado puede estar por arriba de los 90° (C,D), sólo si el contorno de soldadura se extiende más del borde del área soldable de la terminación de soldadura, ver figura 1.9 como referencia.

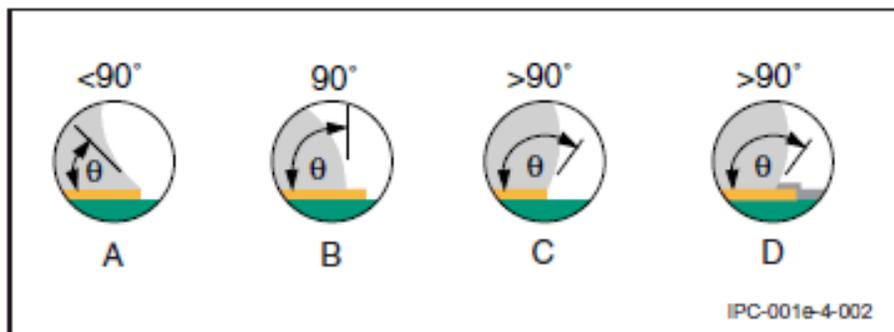


Figura 1.9. Ángulos de mojado aceptables. Fuente: Estándar IPC A 610.

1.1.3.2 Parámetros de soldeo y mejora del proceso

A lo largo del tiempo se han desarrollado algunos trabajos para la mejora del rendimiento del proceso de soldeo por ola, esto a través de la interacción de los diferentes parámetros que intervienen en el proceso. A continuación se hace mención de algunos de los experimentos realizados por diferentes autores con el objetivo de entender el proceso de soldeo por ola y buscar la mejora del mismo.

Arra, Shangguan, Yi, Thalhammer, y Fockenberger en 2002, desarrollaron un experimento dónde utilizaron 3 parámetros: temperatura de tina, velocidad de *conveyor* y tipo de atmósfera, esto con el propósito de mejorar la unión de soldeo. En la tabla 1.2 se presentan un resumen de los parámetros y rangos utilizados.

Factor	Unidad	Nivel		
		Bajo	Medio	Alto
Temperatura de tina	°C	260	-----	270
Velocidad Conveyor	m/min	0.8	1.2	1.6
Atmósfera		Aire	-----	Nitrógeno

Tabla 1. 2 Resumen de parámetros utilizados. Fuente: Minna Arra, Dongkai Shangguan 2002.

Por otra parte, en el artículo desarrollado por Heller y Valle en 2012, proponen un experimento usando la variable de temperatura de precalentamiento, velocidad de *conveyor*, altura de ola e índice de Flux. En la tabla 1.3 se puede observar los niveles del experimento, que en este caso sólo se usan niveles alto y bajo.

Factor	Unidad	Nivel		
		Bajo	Medio	Alto
Velocidad Conveyor	rpms	300	-----	330
Velocidad de ola	ft/min	3.5	-----	4
Temperatura de contacto	°F	Aire	-----	Nitrógeno
Coeficiente de Flux		1.1	-----	1.8

Tabla 1. 3 Resumen de parámetros utilizados. Fuente: Heller y Valle, 2012.

Otros como Andonova y colaboradores realizaron un experimento en 2006, dónde decidieron usar temperatura de calentamiento, velocidad de *conveyor* y altura de ola como variables del experimento, dos niveles para cada factor (Andonova, Dinkova, & Marinov, 2006). Ver tabla 1.4.

Factor	Unidad	Nivel		
		Bajo	Medio	Alto
Temperatura Precalentamiento	°C	130	-----	150
Velocidad Conveyor	in/sec	0.64	-----	0.6
Altura de Ola	mm	5.7	-----	6

Tabla 1. 4 Resumen de parámetros utilizados. Fuente: Andonova, 2006.

En el manual de Alpha de 2011 (ver anexo 1), se describe una forma general acerca de cómo solucionar un problema de soldeo, sin embargo, realmente el manual no da una solución inmediata, sino que más bien ofrece una orientación para encontrar el camino correcto. Por lo que la esencia de la solución al problema del proceso de soldeo deberá estar basada en la experimentación de los factores más representativos.

1.1.3.3 Perfilado del proceso

De acuerdo al estándar IPC 7530 cuando se realiza un perfilado en el proceso de soldeo por ola cuatro áreas deben ser monitoreadas. Estas son descritas como; precalentamiento, pico de temperatura, tiempo de permanencia (*dwell time*) y temperatura máxima en lado *top*.

En el precalentamiento se controla el incremento de temperatura para asegurar que la PCB y sus componentes alcanzan la temperatura adecuada para soldarse y además evitar degradación en los mismos.

La temperatura pico se usa para asegurar que la máxima temperatura que se alcanza no dañe componentes, el *dwell time* se mide para asegurar que se tiene un tiempo adecuado de permanencia en la soldadura y así evitar daño o degradación en la tarjeta, y la máxima temperatura en lado *top* se mide para asegurar que las uniones de soldadura logradas no volverán al estado líquido. En la figura 1.10 se describen gráficamente las variables monitoreadas en un perfilado.

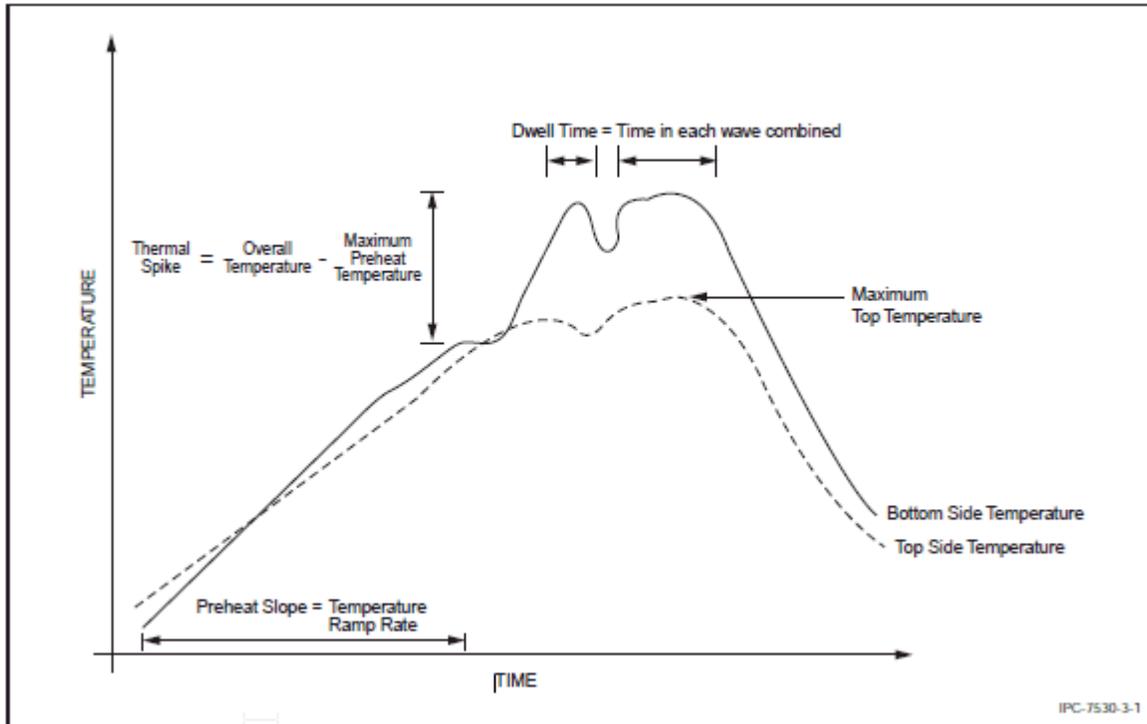


Figura 1.10 Perfilado del soldeo por ola.

1.1.3.4 Efecto de contaminantes en el proceso

A continuación se presenta de manera general un resumen, de los efectos contaminantes que tienen algunos elementos sobre la soldadura. Los cuales deberán ser monitoreados a lo largo del proceso, para evitar problemas de soldadura más graves. Ver tabla 1.5 dónde se presenta el elemento presente en la soldadura y el efecto que causa en el proceso.

Elemento	Efecto
Cobre	Uniones con apariencia arenosa, la capacidad de mojarse se ve reducida.
Aluminio	Uniones arenosas, aumenta la escoria en el crisol.
Cadmio	Reduce la capacidad de mojado de la soldadura, causa que la unión se vea muy opaca. Provoca que el índice de escoria aumente, las uniones se ven escarchadas.
Zinc	

Antimonio	En cantidades arriba de 0.5% puede reducir la capacidad de mojarse de la soldadura. En pequeñas cantidades mejora la capacidad de baja temperatura de la unión de la soldadura.
Hierro	Produce niveles excesivos de escoria.
Plata	Puede provocar uniones opacas, en concentraciones muy altas hará que la soldadura sea menos móvil. No es un contaminante malo. Se añade a algunas aleaciones en forma deliberada.
Nickel	En pequeñas concentraciones, provoca pequeñas burbujas o ampollas en la superficie de la unión.

Tabla 1. 5 Elementos contaminantes y su efecto el proceso de soldeo. Fuente: Vásquez, 2009.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Existe una relación proporcional entre calidad y correcto funcionamiento de la tarjeta, ya que un incorrecto soldeo entre la tarjeta y sus componentes no tendrá una adecuada conexión eléctrica entre los componentes de la tarjeta. Esto dará como resultado que la respuesta o la función esperada no se ejecute de manera correcta.

En algunos de los casos el efecto de la falla puede presentarse al momento de la fabricación de las tarjetas, sin embargo en algunos otros casos, el efecto de la falla ocurre después de cierto tiempo, lo que complica detectarlos al momento del ensamble.

Actualmente la situación en la empresa electrónica situada en el estado de Querétaro enfrenta grandes retos en el área de soldeo por ola ya que la máquina donde se sueldan los componentes está generando defectos en las tarjetas. Esta serie de defectos están fuertemente relacionados con los parámetros que son asignados a la máquina. Al día de hoy, la empresa tiene un aproximado de 10,000 ppms mensuales de tarjetas defectuosas en el área de soldeo, es decir, un aproximado de 4,000 unidades mensuales son re-trabajadas por causas asociadas a problemas de soldadura. Dentro de los principales tipos de defectos por lo cual las unidades son reparadas son: cortos circuitos, exceso de soldadura y faltante de soldadura.

2. OBJETIVOS

2.1 Preguntas de investigación

Cómo parte de las preguntas de investigación, la pregunta principal es si el proceso está o no está controlado. Si se parte de que el proceso es controlado y no es así, la presente investigación no hará una diferencia significativa. Una vez que ésta parte esté realmente estable, nos dirigiremos a realizar una segunda pregunta ¿Es cierto que con la altura de la medida en rpms se puede reducir la cantidad de defectos generados durante el proceso de soldeo por ola? Ésta pregunta es la que lleva a definir la hipótesis, puesto que actualmente la mejora en el proceso se basa en un solo parámetro (altura de Ola).

2.2 Hipótesis

Si se controlan las variables cantidad de *flux*, velocidad del *conveyor*, temperatura del *pot*, precalentamiento y altura de la ola se puede reducir la cantidad de defectos en la máquina de soldeo por ola.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo General

Establecer una relación entre las variables cantidad de *flux*, velocidad del *conveyor*, temperatura del *pot*, precalentamiento y altura de la ola; a fin de identificar cuáles son las más significativas, resultado de un diseño de experimentos con el propósito de reducir la cantidad de defectos generados en la máquina de soldeo.

2.3.2 Objetivos Particulares

- Identificar los parámetros, en base al estado del arte, comúnmente relacionados con el proceso de soldeo por ola durante el desarrollo del protocolo en el último cuarto del 2016.
- Determinar los parámetros más significativos a través de las corridas experimentales a efectuarse en el tercer cuarto del 2017.
- Estandarizar y documentar la metodología para la resolución de problemas asociados a un mal soldeo del resultado de la experimentación en el tercer cuarto de 2017.
- Implementar las mejoras en el proceso para disminuir la cantidad de defectos de soldeo por ola en un 10 % anual.

2.4 Impactos

El impacto que se busca con el presente trabajo es mejorar la estandarización del proceso para lograr un proceso más estable dentro del soldeo por ola. Crear procedimientos e instrucciones de trabajo que permitan realizar un set up del proceso de manera estándar y con ello disminuir los defectos dentro del soldeo por ola, así como definir los parámetros óptimos que contribuyan también al objetivo.

3. METODOLOGÍA

3.1 Definición del problema

Dentro del proceso de soldeo por ola, hay varios parámetros involucrados que se interrelacionan para que los componentes se unan al *pad* que está en la tarjeta por medio de la soldadura. En primera instancia se encuentra la cantidad de *flux* aplicada sobre la tarjeta. El siguiente parámetro es la velocidad del *conveyor*, que es la velocidad a la que las tarjetas viajan a través de la zona de precalentado. El parámetro de temperatura de *pot* (o también conocido como temperatura de tina) es la temperatura que tiene el depósito dónde se encuentra la soldadura, por la que pasará directamente la tarjeta. El siguiente parámetro es la altura de la ola, éste parámetro medido en rpms indica que tanto la tarjeta será sumergida dentro de la tina de soldadura. Se identifican estos parámetros como algunos de los cuáles están influyendo en los defectos que se generan en el soldeo por ola.

A los parámetros les ha sido asignado un rango, sobre el cual el parámetro puede tomar cualquier valor, éste rango de referencia fue establecido globalmente, las locaciones involucradas fueron las de Polonia, China, Alemania y México. La definición se hizo considerando las características de los productos involucrados, la pasta y *flux* utilizados y esto se estableció en una instrucción global. Sin embargo, el hecho de tener rangos de parámetros ya establecidos globalmente no está asegurando un proceso libre de defectos de soldadura; debido a que el rango proporcionado generalmente no es utilizado. Los parámetros son mantenidos por lo general en el mismo número a pesar de que los problemas presentados en los ensambles sean diferentes.

Al momento no existe una combinación de parámetros conocida que pueda disminuir los problemas asociados a un mal soldeo que haya sido comprobada dentro de la organización. Tampoco existe un procedimiento definido de cómo resolver un problema asociado al soldeo dependiendo del tipo de problema que se

presente durante el ensamble. Generalmente los problemas son resueltos a través de la experiencia tanto de ingenieros como de técnicos de mantenimiento.

Otro factor que está afectando el desempeño del soldeo por ola es la alta mezcla de productos que se tiene. Resulta poco probable tener parámetros específicos por producto, los parámetros se dejan establecidos de tal manera que sean estándares para todos los productos. El único parámetro que suele ser diferente por producto es la altura de la ola. Este tipo de estandarización está provocando que el problema se intente resolver involucrando solo un parámetro; se suele olvidar la alta mezcla, tamaño de tarjetas, población de componentes y tipos de componentes.

3.2 Recursos Materiales y Humanos para la experimentación

En esta sección se describe como se llevará a cabo la experimentación requerida para aceptar o rechazar nuestra hipótesis. Se describe también brevemente los recursos materiales y humanos necesarios para llevar a cabo nuestra experimentación y llegar al objetivo final. Se explica cada etapa antes de la experimentación para limitar las variaciones que pudieran afectar a la misma. Para terminar el capítulo con todos los pasos que se involucraron en la experimentación

A continuación se puede observar en la tabla 3.1 y 3.2, una breve descripción de los recursos materiales y humanos necesarios para la experimentación.

	Recurso Material	Descripción	Actividad
1	Máquina de soldeo por ola	SEHO9035	A través de esta máquina se realiza la experimentación para la revisión de los parámetros óptimos, es la encargada de precalentar, colocar el flux y soldar la tarjeta electrónica.
2	Pallets para soldeo de tarjetas	Solder pallets	Éste dispositivo se usa para llevar las tarjetas a lo largo del proceso de soldeo, así como de proteger los componentes de montaje superficial del calor recibido dentro del precalentamiento y el soldeo de componentes. Aunado a que ayuda a evitar que la tarjeta sea contaminada por el flux, ya que contiene aperturas dónde solo se sueldan los componentes.
3	Conveyor	Conveyor	El conveyor es el dispositivo encargado de transportar las tarjetas desde la línea de ensamble hasta la máquina de soldeo por ola para su procesamiento.
4	Soldadura	AIM SN 100 C	Es la soldadura en barra que se coloca dentro de la tina de soldadura para que ésta sea derretida y una vez que la tarjeta pase por ella los componentes puedan soldarse. Ver anexo 2.
5	Flux	AIM NC265	Es el líquido que se usa dentro del proceso de soldeo y se coloca sobre la tarjeta que ayuda para limpiar la tarjeta de polvo y ayuda a lograr un mejor soldeo. Ver anexo 3.
6	Soldadura manual	AIM	En algunos casos la soldadura manual es utilizada para componentes que por su altura no es posible introducir dentro de la máquina de soldeo por ola.
7	Removedor de Flux		Este líquido se usa para remover el exceso de flux que se pudiera dar dentro del proceso, ya que un exceso de flux se considera como contaminación que puede causar problemas de calidad.
8	Cautín	Weller <i>multifunction</i>	Este dispositivo se usa cuando es necesario soldar manualmente, éste entra en contacto con la soldadura manual, calentándola y soldando los componentes.

Tabla 3. 1 Descripción de recursos material necesarios. Fuente: Elaboración propia.

	Recurso Humano	Área	Actividad
1	Ing. Procesos	Ingeniería	El ingeniero de procesos es la persona que da el soporte al área de producción en la definición de procedimientos, métodos de trabajo y parámetros del proceso de soldeo por ola.
2	Ing. Mantenimiento	Producción	El ingeniero de mantenimiento es la persona que da el soporte en la producción, asegurando la calidad de las partes que salen del proceso de soldeo, es el encargado de proporcionar el mantenimiento a la máquina de soldeo y guardar los respectivos registros. Coordina a los diferentes técnicos.
3	Operadores de ensamble	Producción	Son las personas responsables de realizar el ensamble de los componentes TH dentro de la tarjeta para su respectivo ensamble y posterior soldeo dentro del soldeo por ola.
4	Inspector Visual	Producción	Después de que las tarjetas electrónicas pasan por el soldeo por ola una persona es la encargada de sacar las tarjetas del pallet y de realizar una inspección visual en ellas, determinando la conformidad o no de las partes.
5	Supervisores	Producción	Los supervisores son los soportes del área de producción que coordinan al personal operativo para las diferentes tareas de ensamble. Ellos serán los responsables de asignar al personal necesario para el ensamble de las tarjetas electrónicas.

Tabla 3. 2 Descripción de recursos humanos necesarios .Fuente: Elaboración propia.

3.3 Sistema de medición

Método de medición toma de perfil (temperatura de tina)

Uno de los aspectos críticos dentro del soldeo por ola es la temperatura que la soldadura en barra logra una vez que es introducida en la tina de soldeo. Para revisar el proceso actual se tomaron mediciones reales del proceso de producción y se evaluaron con el uso de un gráfico realizado en minitab⁶.

Dentro de la gráfica se observó que la capacidad del proceso no es robusta, puesto que el índice logrado es apenas de 0.77 con una desviación de más de 2 unidades. Ver figura 3.1.

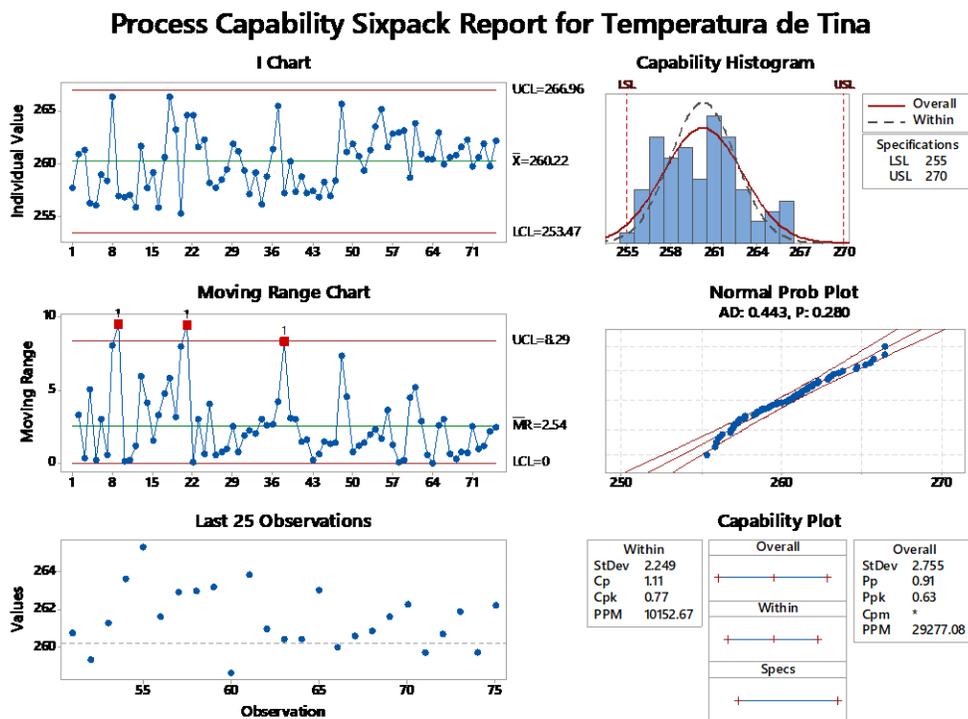


Figura 3.1 Análisis de capacidad en la medición de la temperatura de tina (temperatura de pot).

Fuente: Propia.

⁶ Minitab: Software utilizado para cálculos estadísticos. Ver <http://www.minitab.com/es-mx/>

En la gráfica de datos individuales se observó que los datos se dividen en 2 estratos, aproximadamente en el dato 47 se ve un cambio abrupto en el comportamiento. Ver figura 3.2.

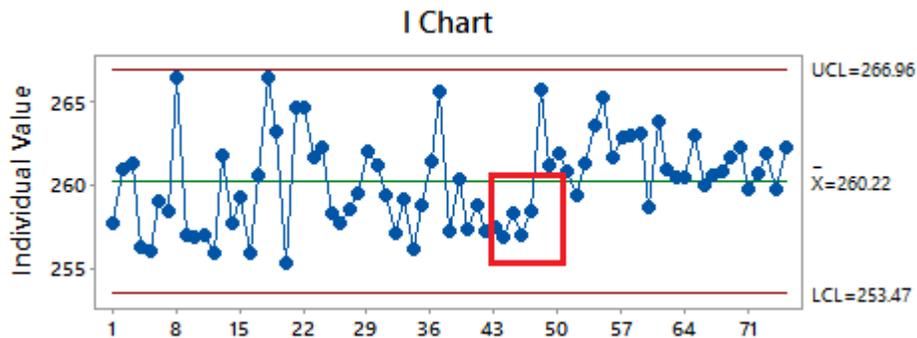


Figura 3.2. Análisis de capacidad, cambio abrupto de en el comportamiento. Fuente: Propia.

La investigación realizada para conocer la razón de éste cambio en el comportamiento de los datos derivó en qué los datos provenían de las mediciones realizadas por dos diferentes técnicos. Para determinar si existe una diferencia entre la metodología de medición de los técnicos se organizaron los datos y se hicieron gráficos individuales de cada técnico. Ver figura 3.3 para el técnico 1 y 3.4 para el técnico número 2.

Process Capability Sixpack Report for Técnico 1

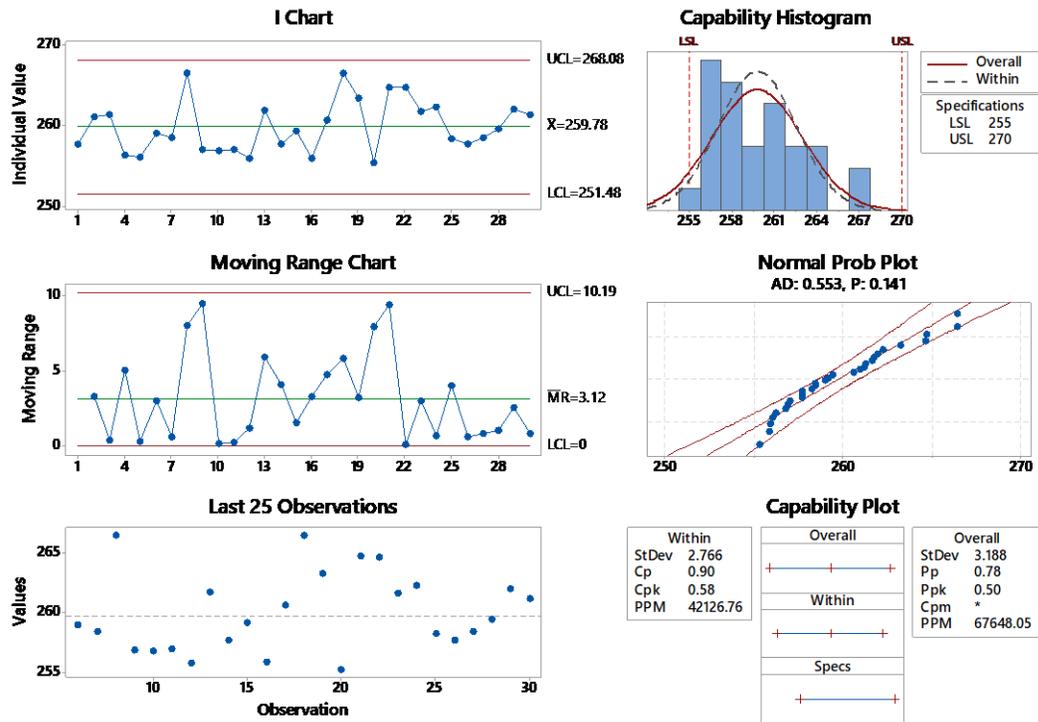


Figura 3.3. Análisis de Capacidad técnico 1. Fuente: Propia.

Process Capability Sixpack Report for Técnico 2

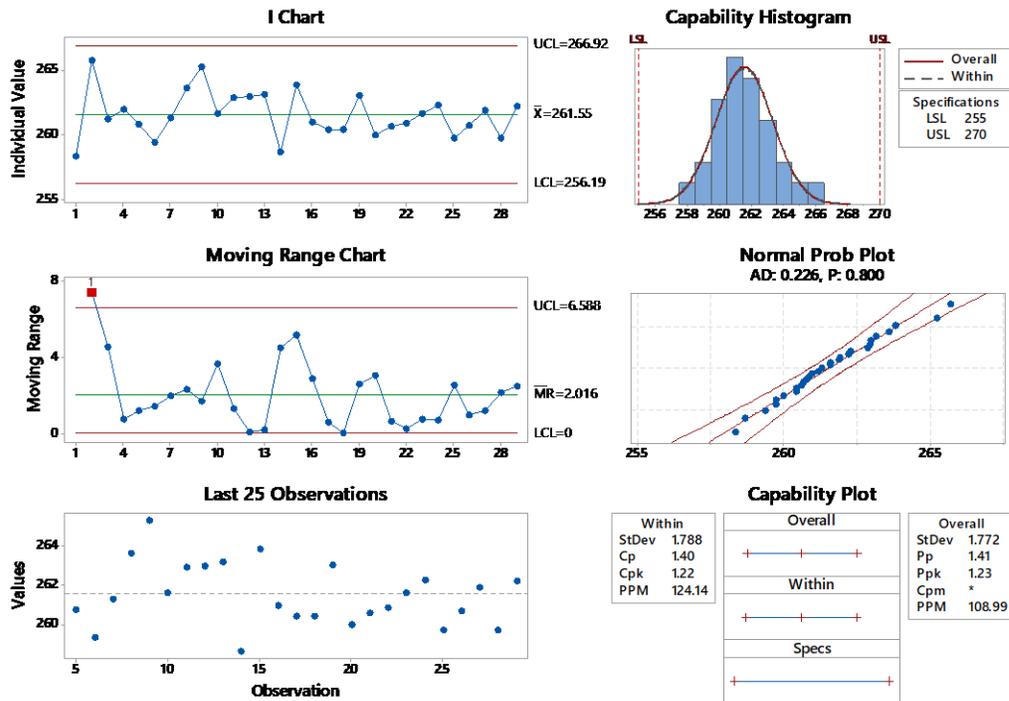


Figura.3.4 Análisis de Capacidad Técnico 2.

En el caso del técnico número 1 presenta mayor variación, con un cpk de 0.58 y una desviación estándar de 3 unidades, mientras que el técnico número 2 tiene un cpk arriba de 1 y una desviación de más de una unidad debajo de la desviación presentada por el técnico 1.

Después de una inspección a la técnica de ambos técnicos se encontró lo siguiente;

- 1.-El operador 2 tiene una metodología consistente para la toma del perfil.
- 2.-El operador 1, realiza la toma del perfil en ocasiones cuando aún no realiza la limpieza de la tina de soldadura (retirar la escoria), provocando esto en gran medida la variación en sus datos.
- 3.-No existe una metodología definida para la toma del perfil, el procedimiento no está estandarizado.

El primer paso para una medición correcta en la toma de la temperatura real de la máquina es la de la toma del perfil de soldadura. Para ello se estandarizó la metodología, y sobre todo se definió una frecuencia de limpieza para la escoria. Ver anexo 4.

3.4 Línea base (estado inicial)

Medición de la situación actual

Cómo parte de la metodología, el paso número uno a ejecutar fue la búsqueda del estado actual del proceso, para ello se recopiló información de la producción en el área de soldeo por ola, se tomó información del año 2015. El objetivo número uno fue definir la línea con mayor cantidad de problemas, para de esta manera ir partiendo de lo general a lo particular. Una vez hecho esto, se realizó un gráfico de barras que muestra los productos que tienen la mayor cantidad de defectos, posterior a ello se realizó una tabla que indica el top 3 de cada producto. En la figura 3.5 se puede revisar el Pareto realizado para determinar la línea con mayor grado de defectos, en la figura 3.6 se observa el gráfico con los productos con más alto nivel de ppms y en la tabla 3.3 se observa el top 3 de defectos de cada producto.

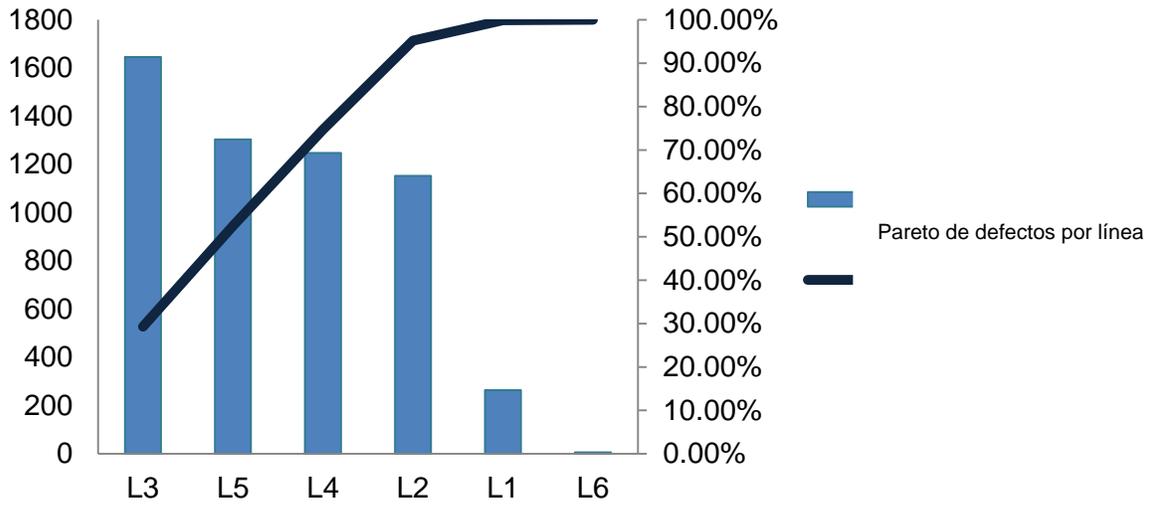


Figura 3.5. Pareto de cantidad de defectos por línea. Fuente: área de análisis y reparación.

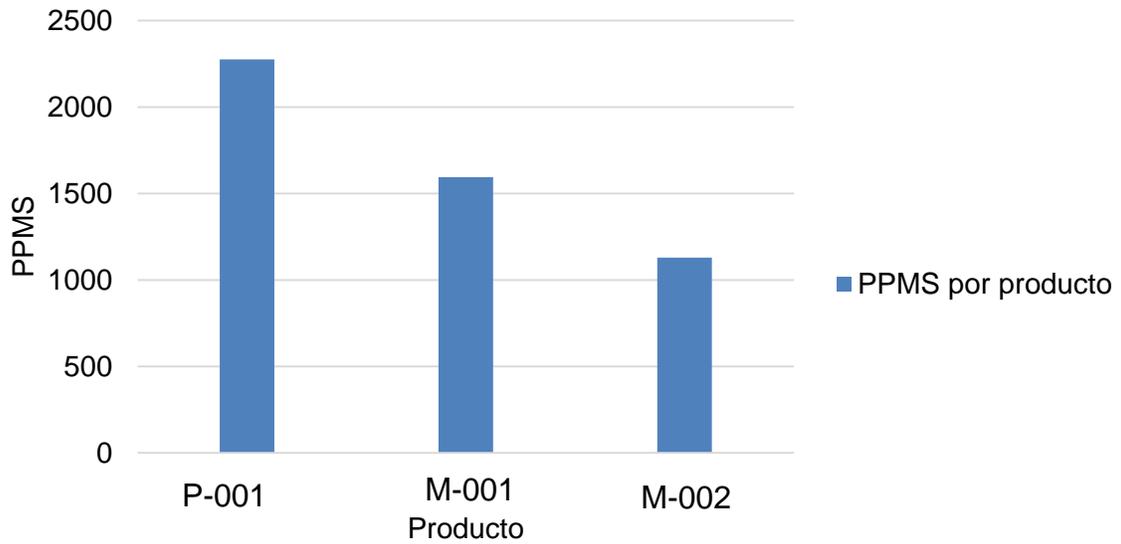


Figura 3.6. Gráfico de PPMS por producto. Fuente: área de análisis y reparación.

Producto	Top 3	Defecto
P-001	1	Corto de Soldadura
	2	Exceso de Soldadura
	3	Faltante de Soldadura
M-001	1	Corto de Soldadura
	2	Faltante de Soldadura
	3	Exceso de Soldadura
M-002	1	Corto de Soldadura
	2	Faltante de Soldadura
	3	Exceso de Soldadura

Tabla 3. 3 Top 3 de defectos por producto. Fuente: área de análisis y reparación.

El objetivo de la tabla 3.3 fue revisar los tres principales problemas en el área de soldeo, como se observa en la tabla, en los 3 productos con mayor cantidad de defectos se encuentran cortos de soldadura en el lugar uno, después hay 2 productos que el segundo problema más grande son los exceso y en tercer puesto están los faltantes de soldadura.

Para una mejor conciencia del impacto que tiene el tema de soldeo por ola, se tomaron datos de todo el año 2016. La información se ordenó de manera mensual y lo que se presenta en la tabla 3.4 son los PPMs calculados mensualmente, con la cantidad de fallas reportados por problemas de soldeo en el área de Análisis y Reparación.

Mes	Cantidad de Fallas Soldeo por Ola	PPMS
Enero	5061	17,026
Febrero	3278	10,320
Marzo	2771	8,596
Abril	3993	11,427
Mayo	2090	5,890
Junio	2704	7,843
Julio	3336	9,833
Agosto	4339	12,198
Septiembre	876	2,857
Octubre	4512	13,496
Noviembre	4283	11,337
Diciembre	2105	7,855

Tabla 3. 4 Cantidad de Fallas Soldeo por Ola. Fuente: área de análisis y reparación.

A manera gráfica se presenta la información anteriormente descrita considerando tanto la cantidad de fallas de Soldeo por Ola (WS) como los ppms de cada mes.

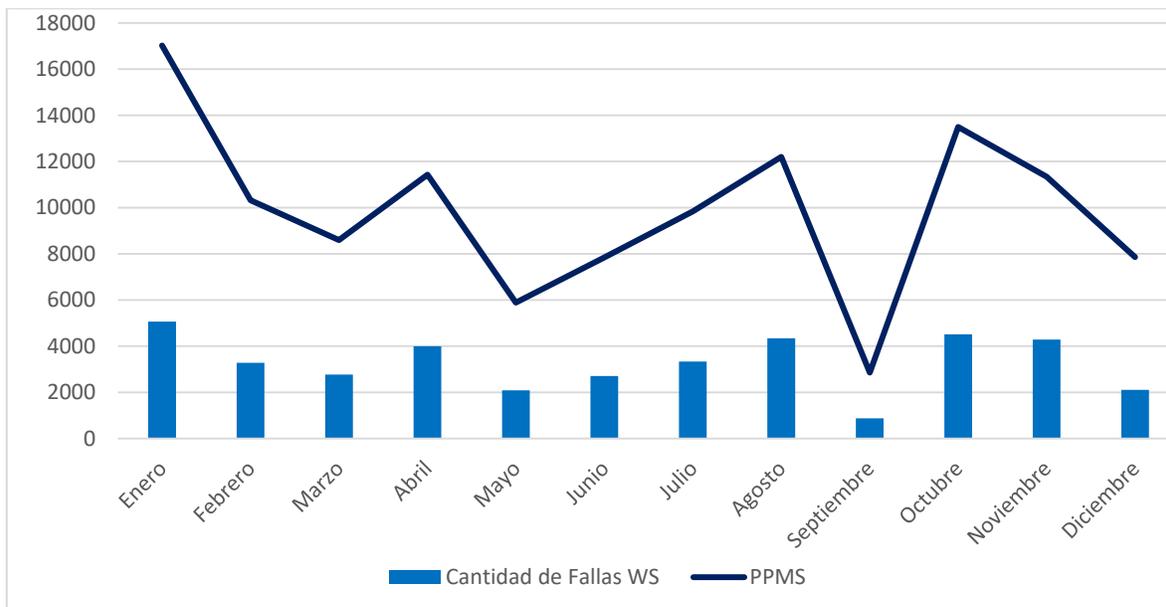


Figura 3.7. Cantidad de Fallas Soldeo por Ola. Fuente: área de análisis y reparación.

Actualmente el área de análisis y reparación lleva un indicador del porcentaje de reparación, éste se lleva diariamente, mensual y anual. El inconveniente del indicador es que se presenta en términos porcentuales, en el cual indica que abajo del 1% aún está dentro de objetivo. Por lo que un porcentaje en algún punto puede confundir la situación real del problema, puesto que no considera la cantidad de partes fabricadas.

Posterior al análisis de ppms se organizó un Pareto, dónde se pueda apreciar los cuatro tipos de problemas comunes en el soldeo; falla de soldeo (picos), soldadura faltante, exceso de soldadura y corto de soldadura. Ver figura 3.8.

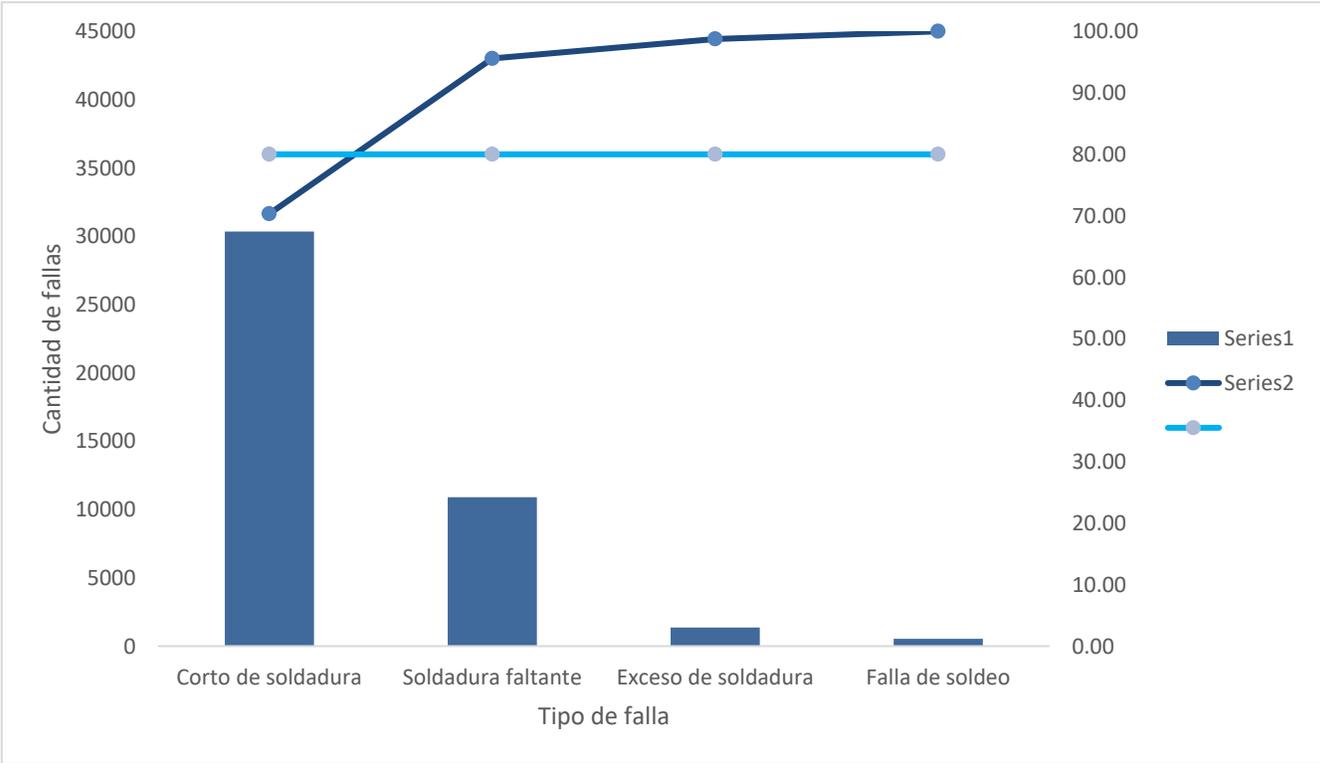


Figura 3.8 Pareto de defectos reportados durante el año 2016. Fuente: área de análisis y reparación.

El resultado del Pareto muestra que el problema más grave son los cortos de soldadura, que de hecho se lleva el 80%. En segundo lugar se encuentra la soldadura faltante y en tercer sitio el exceso de soldadura.

Para medir el impacto económico de éstos defectos se realizó una gráfica donde se ilustra el costo por mes, el costo fue dividido en tres rubros; costo de scrap, costo de retrabajo en el área de análisis y reparación y costo del retoque en la línea de soldeo por ola. Aquí se observó que en el mes de enero y octubre se tuvo un costo de alrededor de \$70,000 pesos. Y donde es evidente que el problema de costo más grave se encuentra en el retoque que se realiza después de soldeo por ola. Ver figura 3.9.

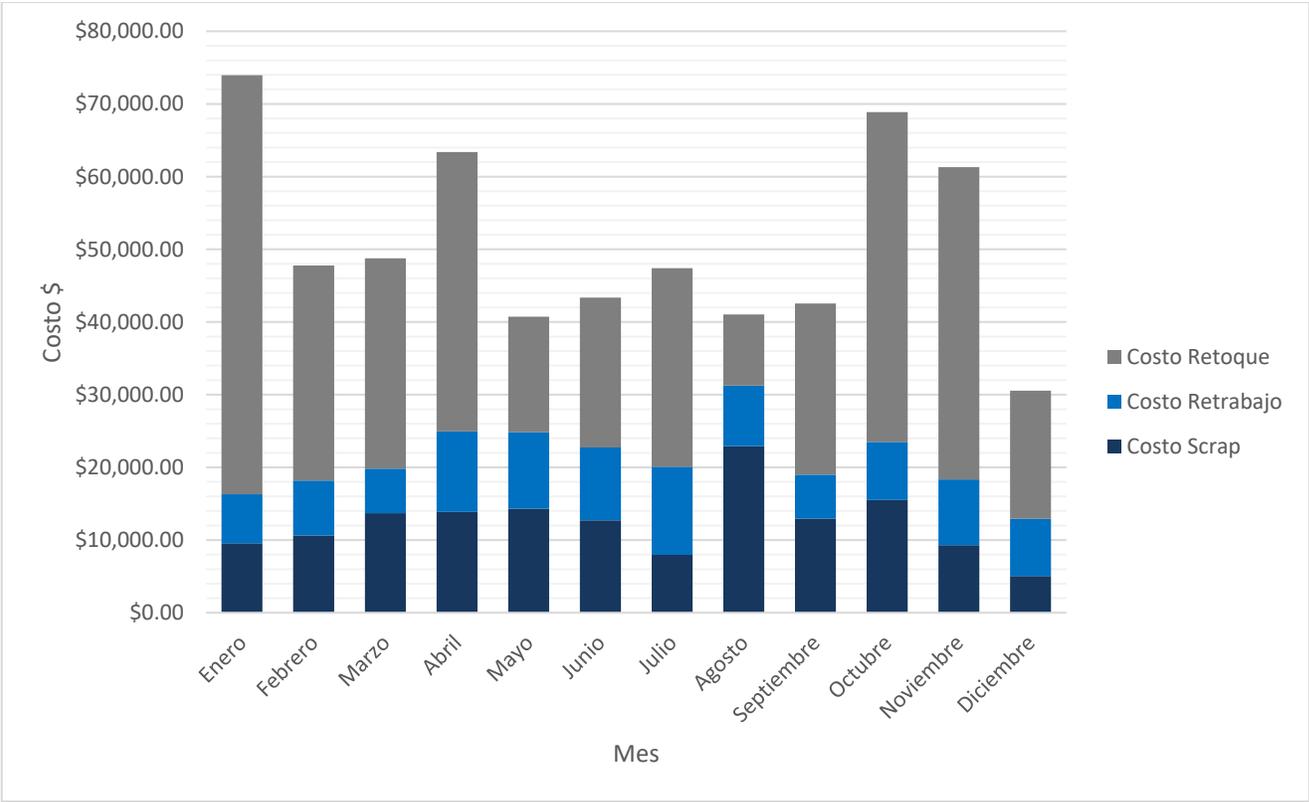


Figura 3.9 Desglose de principales costos 2016. Fuente: área de análisis y reparación.

Para darnos una idea más clara del porcentaje que aporta cada área a los costos totales se realizó una gráfica de pastel con la información contenida en la tabla 3.5.

Mes	Costo Scrap	Costo Retrabajo	Costo Retoque
Enero	\$9,564.46	\$6,743.10	\$57,652.25
Febrero	\$10,627.45	\$7,567.70	\$29,592.60
Marzo	\$13,695.78	\$6,124.65	\$28,952.76
Abril	\$13,873.72	\$11,085.55	\$38,417.06
Mayo	\$14,303.00	\$10,566.85	\$15,862.70
Junio	\$12,719.66	\$10,008.25	\$20,621.51
Julio	\$7,964.76	\$12,116.30	\$27,326.50
Agosto	\$22,923.13	\$8,332.45	\$9,770.89
Septiembre	\$12,945.41	\$6,052.50	\$23,554.11
Octubre	\$15,506.37	\$8,006.60	\$45,361.99
Noviembre	\$9,302.19	\$9,030.70	\$42,975.92
Diciembre	\$5,048.46	\$7,886.90	\$17,622.26
Subtotal	\$148,474.39	\$103,521.55	\$357,710.55
Total		\$609,706.49	

Tabla 3. 5 Total de costos en área de soldeo por ola 2016. Fuente; área de análisis y reparación.

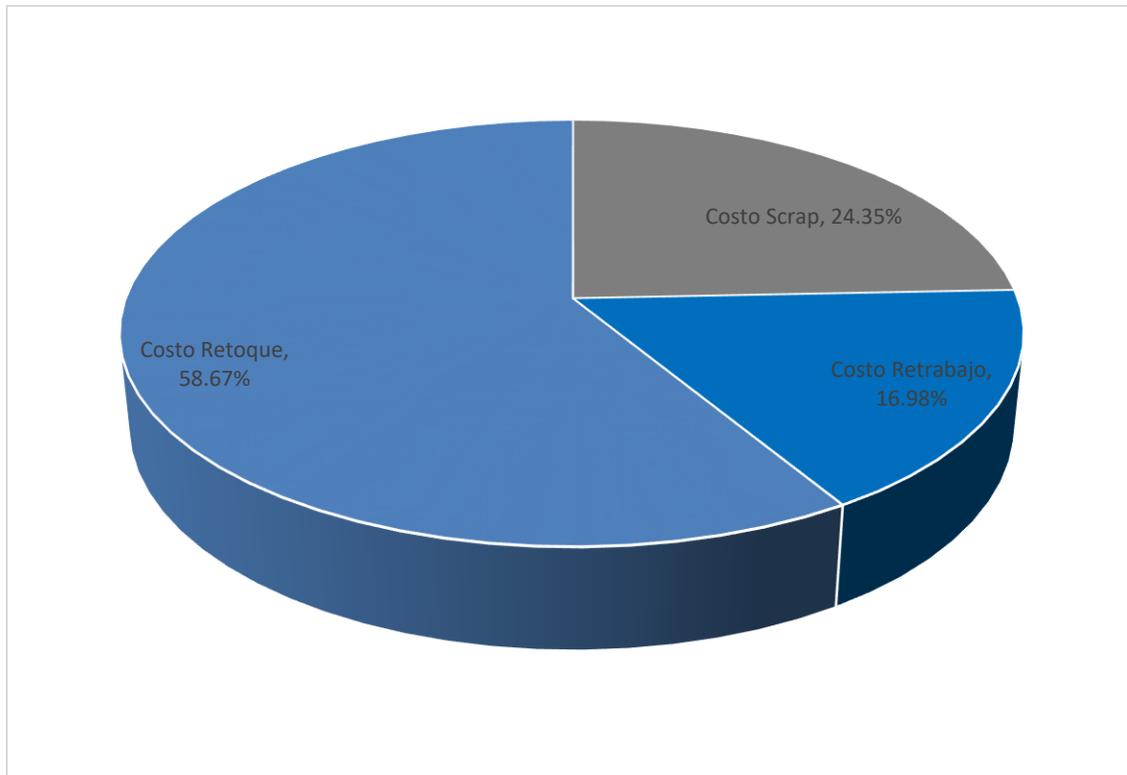


Figura 3.10. Gráfico de pastel del total de costos en área de soldeo por ola 2016. Fuente; área de análisis y reparación.

3.5 Definición de las variables

Posteriormente, a través de un diagrama de flujo detallado se estudió cada una de los pasos que forman el soldeo por ola. De esta manera que se identificó las variables asociadas a cada paso del proceso. Con esta información se realizó un diagrama de parámetros, los cuales fueron detectados durante esta etapa.

Con la obtención de este diagrama de parámetros se determinaron las Xs de nuestra experimento, entendiendo que en éste caso nuestra Y o variable de respuesta corresponde a los defectos generados después del soldeo por ola.

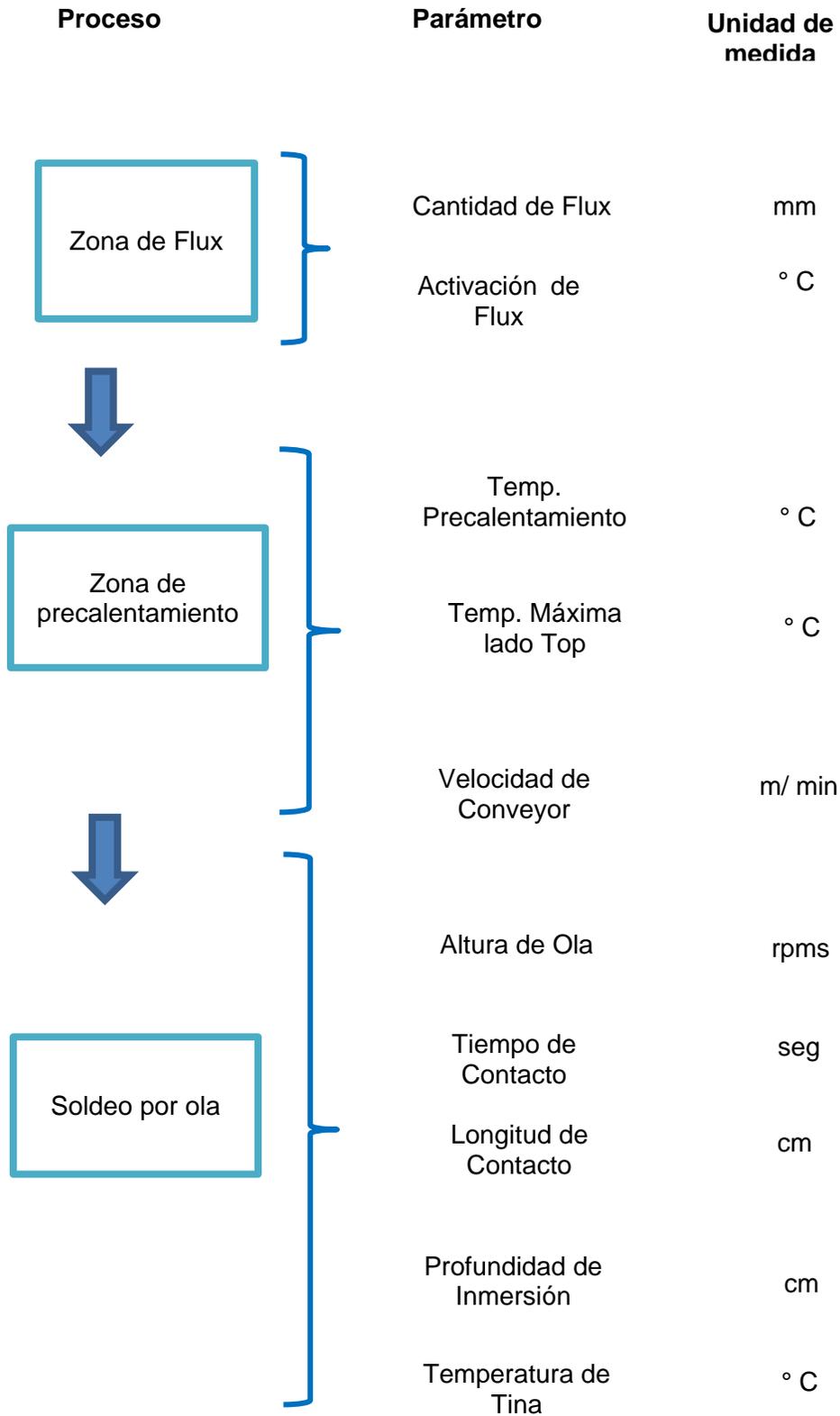


Figura 3.11 Definición de variables del proceso. Fuente: Elaboración propia

3.6 Experimentación

3.6.1 Medición de la activación del flux

Entendiendo que después de una correcta aplicación de flux, se necesita que durante la etapa de precalentamiento éste se evapore permitiendo una correcta activación y el mínimo de residuos posibles, se realizó un estudio para asegurar que el flux está llegando a la temperatura adecuada. Para ello nuestra variable respuesta fue la temperatura que se logra en la zona de precalentamiento, la cual de acuerdo al proveedor deberá ser de 85°C. En la figura 3.12 se puede observar el perfil tomado, que indica que se logra una temperatura adecuada durante el precalentamiento, permitiendo así la evaporación del flux.

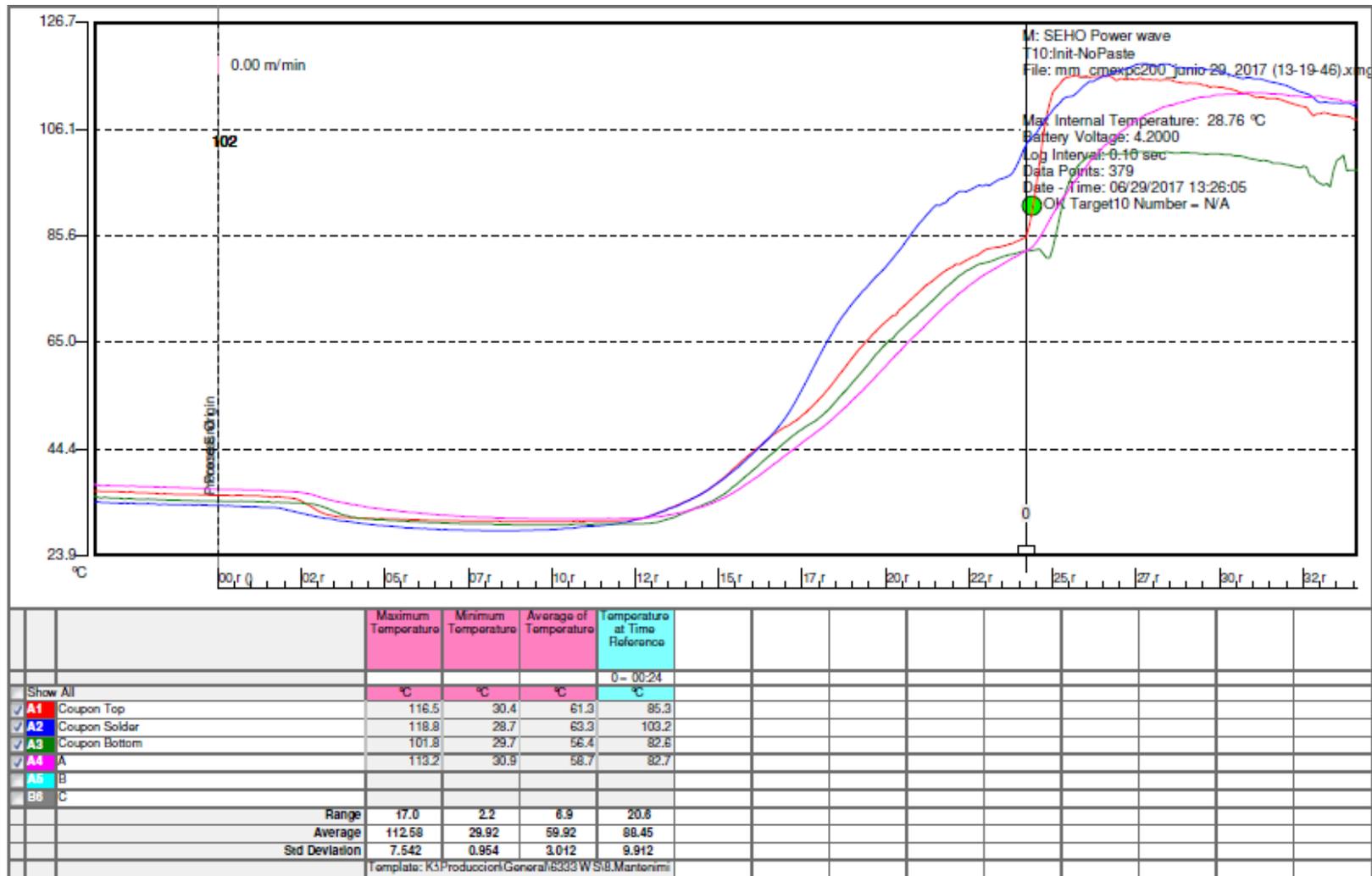


Figura 3.12 Perfil de temperatura que indica activación correcta de flux. Fuente: Wave Raider.

3.6.2 Definición de variables a considerar dentro de la experimentación

Para llevar a cabo la experimentación en el proceso, se buscó descartar los parámetros de menor relevancia, que permitan la ejecución de un diseño de experimentos más estable con las variables finales seleccionadas. Para esto se buscó dentro de los antecedentes del proyecto aquellos experimentos realizados por otros autores, para saber aquellas variables que se usaron para mejorar el desempeño del soldeo. Recordemos que en el estado inicial se llegó a la conclusión de que el principal problema presentado son los cortos de soldadura (unión entre dos terminales metálicas). Por lo que se realizó un diagrama de Ishikawa (figura 3.13) con la ayuda de gente experta lo que determinó las variables a usar dentro del experimento. (Ver tabla 3.6).

Factor	Descripción	Nivel	
		Bajo	Alto
A	Cantidad de Flux	35ml/min	50ml/min
B	Pre calentamiento	Bajo	Alto
C	Altura de Ola	350rpms	550rpms
D	Velocidad del Conveyor	0.8m/min	1.3m/min
E	Temperatura del soldadura	260°C	275°C

Tabla 3. 6 Variables para experimentación. Fuente: Elaboración propia.

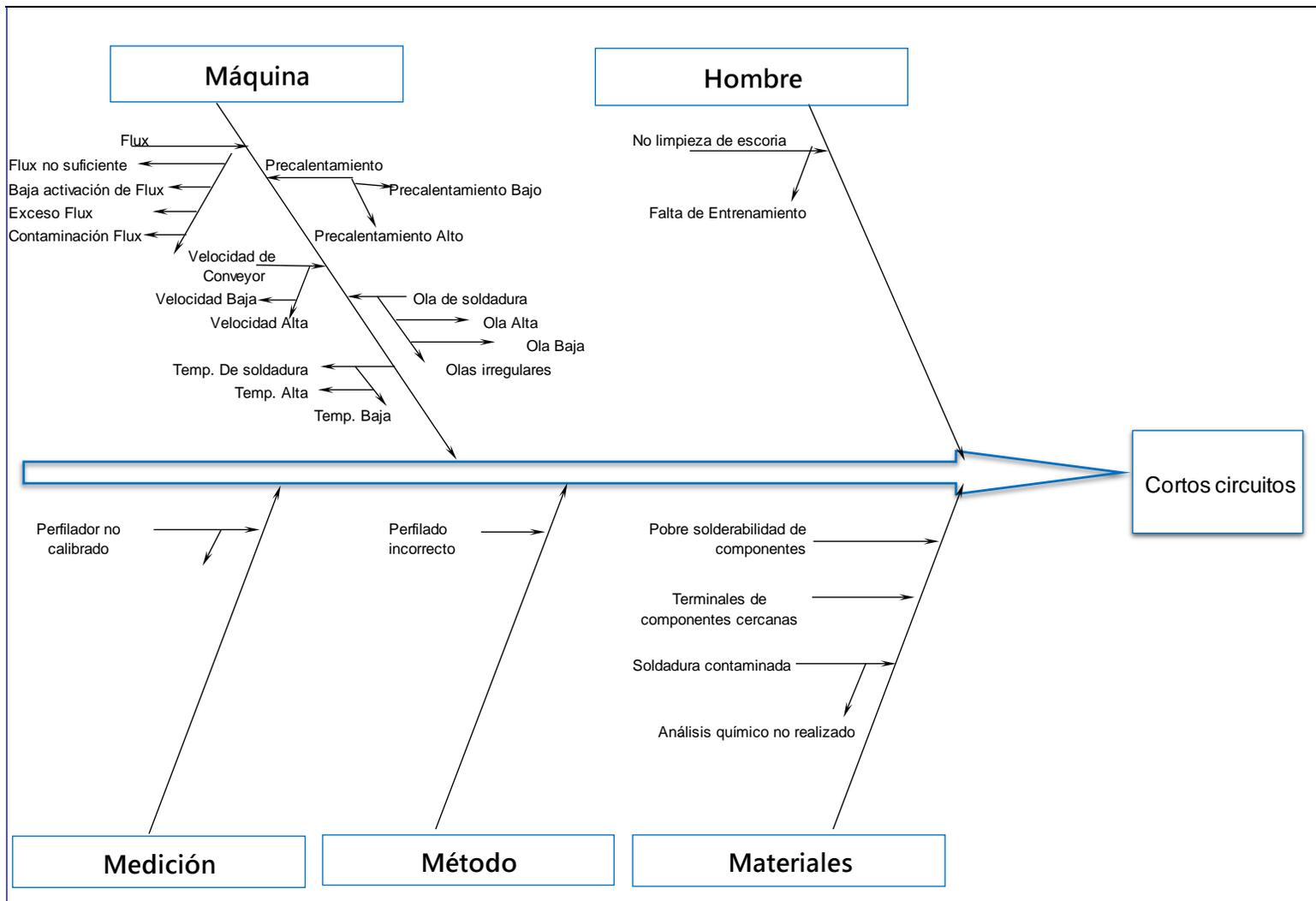


Figura 3.13. Diagrama de Ishikawa, cortos circuitos. Fuente: Elaboración propia.

3.6.3 Definición e implementación de la metodología experimental a seguir

Para mejorar el comportamiento del soldeo por ola se diseñó un experimento óptimo con 5 factores, 2 niveles cada uno de ellos a través del software R Studio⁷. En R se cargó la librería `fac.design` para obtener el diseño factorial utilizando los 5 factores descritos anteriormente.

```
> t1<-fac.design(nlevels = c(2,2,2,2,2),nfactors = 5,replication=1,blocks=1)
```

Corrida	A	B	C	D	E
1	2	1	2	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	1	2	1
4	2	1	1	2	1
5	1	1	2	1	2
6	1	1	2	1	1
7	1	2	1	1	2
8	2	1	1	1	1
9	2	2	2	1	2
10	1	2	2	1	2
11	1	1	1	1	1
12	2	2	1	1	2
13	2	1	1	1	2
14	2	2	1	2	1
15	2	2	1	2	2
16	2	1	1	2	2
17	1	1	1	2	2
18	2	1	2	2	2
19	1	2	2	1	1
20	1	2	1	2	2
21	1	1	1	1	2
22	2	1	2	2	1
23	2	1	2	1	2
24	2	2	1	1	1

⁷ R Studio: Software gratuito utilizado para cálculos estadísticos.

25	1	2	1	2	1
26	1	2	2	2	1
27	1	2	2	2	2
28	2	2	2	2	2
29	1	1	2	2	1
30	1	2	1	1	1
31	2	2	2	1	1
32	2	2	2	2	1

Tabla 3. 7 Propuesta experimental. Fuente: R Studio.

Después se optimizó el diseño utilizando la técnica de Federov para disminuir los materiales y tiempo de máquina requerido. Dónde con un total de 8 corridas experimentales se obtiene una eficiencia de 100%.

```
> t1.opt<-optFederov(frml=~A+B+C+D+E,data=t1,nTrials=8)
```

```
> t1.opt$Ge
```

```
[1] 1
```

```
> t1.opt$Dea
```

```
[1] 1
```

```
> t1.opt$design
```

	A	B	C	D	E
1	2	2	2	2	2
1	1	2	1	1	1
2	2	1	1	1	2
1	2	1	2	2	1
2	1	2	2	2	2
2	1	1	2	2	1
1	1	1	1	1	2
2	2	2	2	1	1

Tabla 3. 8 Propuesta experimental optimizada con Federov. Fuente: R Studio.

3.6.4 Realización de la experimentación

Para llevar a cabo la experimentación se realizaron un total de 8 muestras, ensambladas en las mismas condiciones. La tarjeta electrónica elegida es una que consta de dos tarjetas electrónicas unidas por cuatro conectores. La tarjeta que sostiene la segunda tarjeta contiene un conector en cada esquina ensamblados en ella vía montaje superficial, la segunda tarjeta se sobrepone sobre los conectores, una vez hecho esto ambas se pasa por el soldeo por ola para finalizar la unión.

Por lo que los componentes principales de nuestra tarjeta son; 1) cuatro conectores que ayudan a la unión de ambas tarjetas, los cuales actualmente tienen problemas de cortos circuitos 2) la tarjeta que es sostenida lleva consigo un display de varias terminales, en las que el problema principal es el faltante de soldadura.

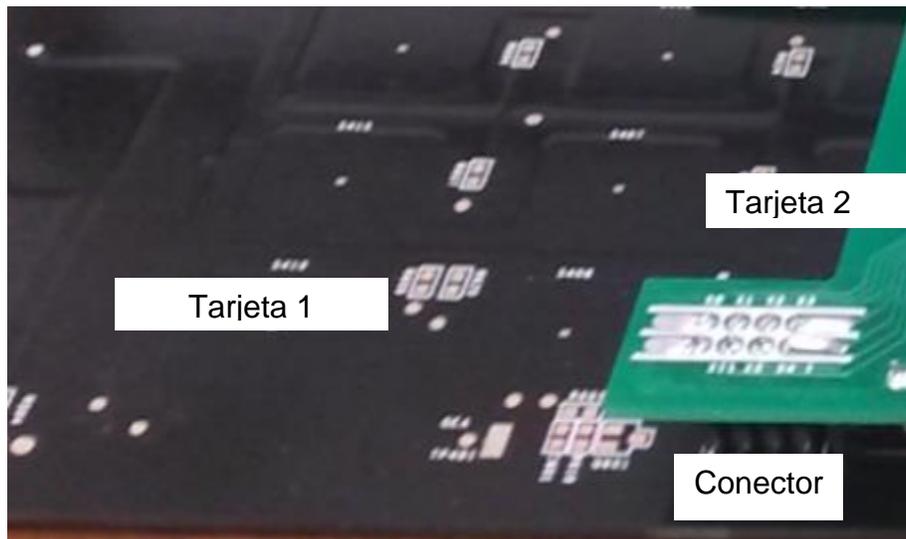


Figura 3.14 Tarjeta electrónica a utilizar dentro de la experimentación. Fuente: Propia.

La decisión de elegir esta tarjeta electrónica es debido a que como vimos presenta dos problemas principales; cortos de soldadura y faltante de soldadura.

El propósito del experimento es determinar aquellos parámetros óptimos que ayuden a mejorar la condición de cortos circuitos sin afectar al correcto soldeo en el display, ya que contiene varias terminales dónde se pudieran generar defectos, es decir, la idea es buscar reducir la cantidad de cortos, sin embargo, el hecho de reducir los cortos no implica que sean aceptables otro tipo de defectos tanto en el display como en los conectores.

Los ocho experimentos realizados se hicieron en la misma línea de ensamble y en el mismo día para la eliminación de potenciales variables.

A continuación se presenta de manera resumida en la tabla 3.9 los resultados de la experimentación. Se incluye el diseño experimental y los parámetros utilizados para cada pieza.

En la primera columna, en la parte de parámetros se indican dos cosas; primeramente el diseño utilizado, considerando los 5 factores y dos niveles para cada uno de ellos, y por otro lado se observa los niveles y unidades de medida de cada nivel. En la segunda columna se indican los cortos resultantes de cada experimentación, en la tercera se muestran los faltante de soldadura tanto en conectores cómo en el área de display, en la cuarta columna se observaron los filetes no correctos . En la última columna se observa la cantidad de defectos totales encontrados en cada tarjeta.

Item	Parámetros					Cortos	Faltante de Soldadura	Filete incorrecto	Defectos Totales
1	A 1	B 2	C 2	D 2	E 2	1	4	8	13
	A=Flux: 35ml/min B=Precaentado: Alto C=Altura de Ola: 550°C D=Velocidad de Conveyor: 1.3 m/min E=Temperatura Soldadura: 275°C								
2	A 1	B 1	C 2	D 1	E 1	1	1	4	6
	A=Flux: 35ml/min B=Precaentado: Bajo C=Altura de Ola: 550°C D=Velocidad de Conveyor: 0.8 m/min E=Temperatura Soldadura: 260°C								

	A	B	C	D	E				
3	2	2	1	1	2				
	A=Flux: 50 ml/min B=Precaentado: Alto C=Altura de Ola: 350°C D=Velocidad de Conveyor: 0.8 m/min E=Temperatura Soldadura: 275°C					2	0	0	2
4	1	2	1	2	1				
	A=Flux: 35 ml/min B=Precaentado: Alto C=Altura de Ola: 350°C D=Velocidad de Conveyor: 1.3 m/min E=Temperatura Soldadura: 260°C					3	9	3	15

	A	B	C	D	E				
5	2	1	2	2	2	1	3	4	8
	A=Flux: 50 ml/min B=Precaentado: Bajo C=Altura de Ola: 550 rpms D=Velocidad de Conveyor: 1.3 m/min E=Temperatura Soldadura: 275°C								
6	2	1	1	2	1	4	0	3	7
	A=Flux: 50 ml/min B=Precaentado: Bajo C=Altura de Ola: 350 rpms D=Velocidad de Conveyor: 1.3 m/min E=Temperatura Soldadura: 260°C								

	A	B	C	D	E				
7	1	1	1	1	2				
	A=Flux: 35 ml/min B=Precaentado: Bajo C=Altura de Ola: 350 rpms D=Velocidad de Conveyor: 0.8 m/min E=Temperatura Soldadura: 275°C					3	2	0	5
8	2	2	2	1	1				
	A=Flux: 50 ml/min B=Precaentado: Alto C=Altura de Ola: 550 rpms D=Velocidad de Conveyor: 0.8 m/min E=Temperatura Soldadura: 260°C					0	0	0	0

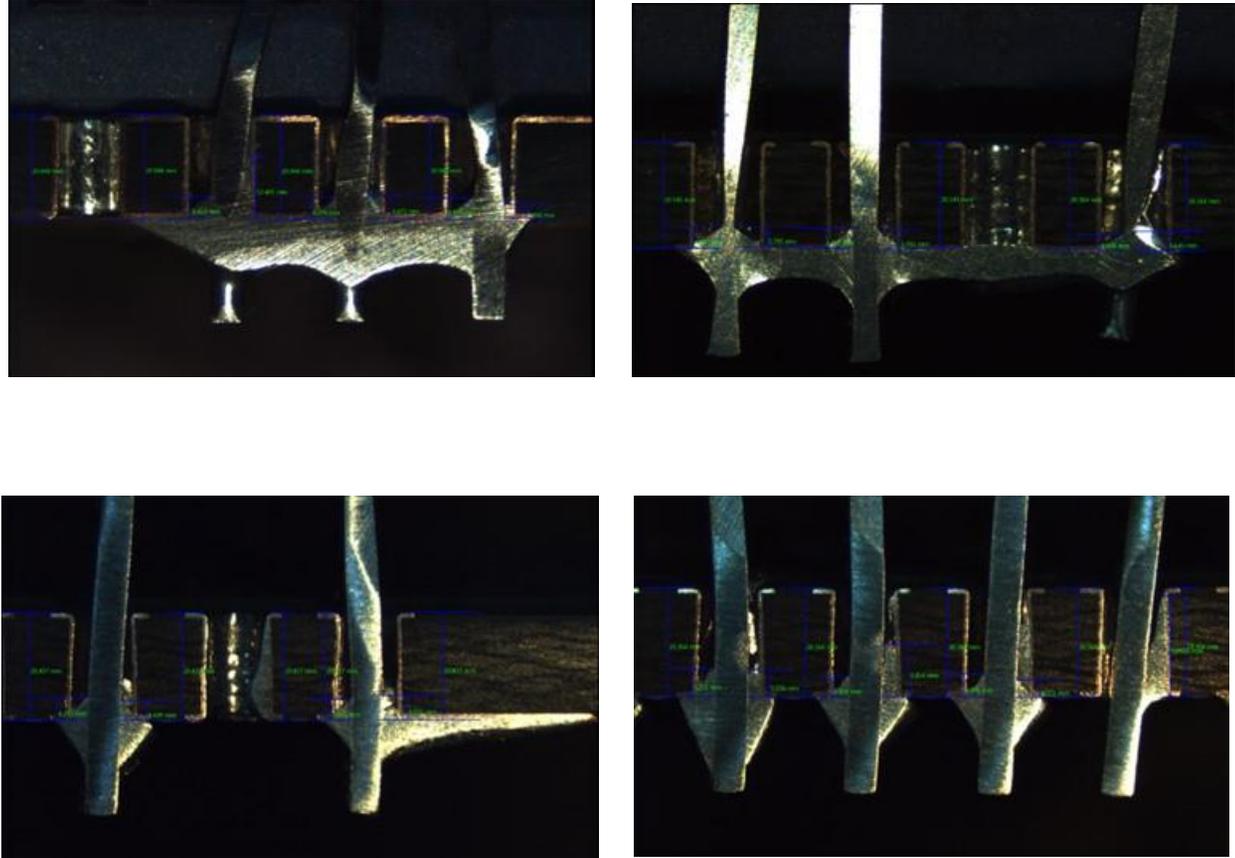
Tabla 3. 9 Resultados experimentales. Fuente: Elaboración Propia.

Después de llevar a cabo la experimentación se realizó sobre la tarjeta número 4, 6 y 8 una prueba de confiabilidad. La tarjeta número 4 fue elegida debido a que es la que presenta la mayor cantidad de defectos, la tarjeta número 6 tuvo la mayor cantidad de cortos circuitos (punto de interés) y finalmente la tarjeta número 8 que fue la tarjeta que no cuenta con defectos.

La prueba a la que se sometieron simula 10 años de vida de operación de la tarjeta, dónde se aplican diferentes temperaturas y humedades. El objetivo de la prueba es asegurar que el proceso de manufactura llevado a cabo en el soldeo por ola no afecta a las tarjetas, ya que se estuvieron combinando varios niveles de parámetros. La prueba realizada fue la llamada de ciclo térmico (termal cycle), ésta tiene una duración de 10 días durante los cuales se realizan 125 ciclos de temperatura que van desde -40°C hasta 115°C.

Los resultados de la prueba llevada en la cámara de temperatura muestran que las tarjetas no sufrieron daños, la evaluación se realizó de manera visual, el resultado final fue que las piezas no presentan corrosión. Ver anexo 5.

Después de haber realizado la prueba de ciclo térmico se realizaron pruebas de corte en los componentes más críticos (conectores y display). Este tipo de prueba se realiza para identificar que se tuvo un buen llenado de barril, y dado a que tanto la pieza 4 y 6 no se observan un buen resultado se busca corroborar esto en los cortes. Por otro lado en la pieza número 8 buscamos que no exista problemas de llenado puesto que visualmente se observa que una de las mejores piezas ya que no presenta defectos. En la tabla 3.10, 3.11 y 3.12 se resumen los resultados de las 3 piezas en las pruebas de corte.

Pieza Número 4	Secciones de corte	Resultado
<p data-bbox="241 657 359 824">Área De Display</p>		<p data-bbox="1738 657 1896 743">Llenado no correcto</p>

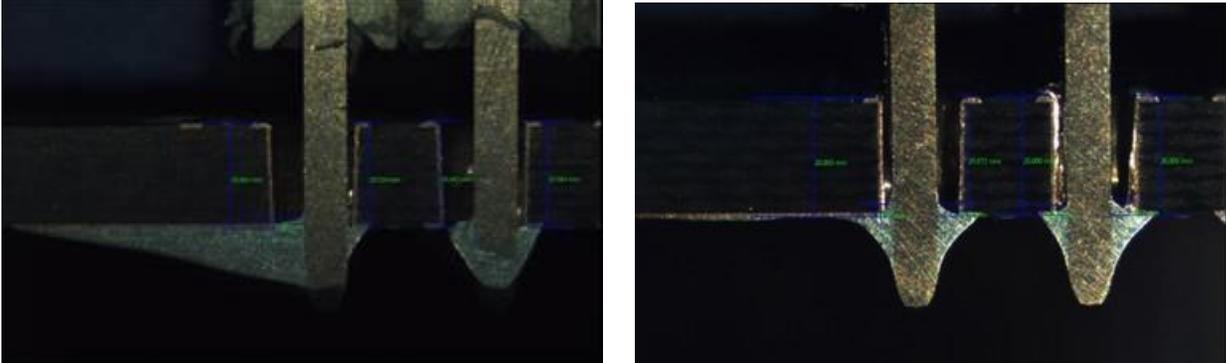
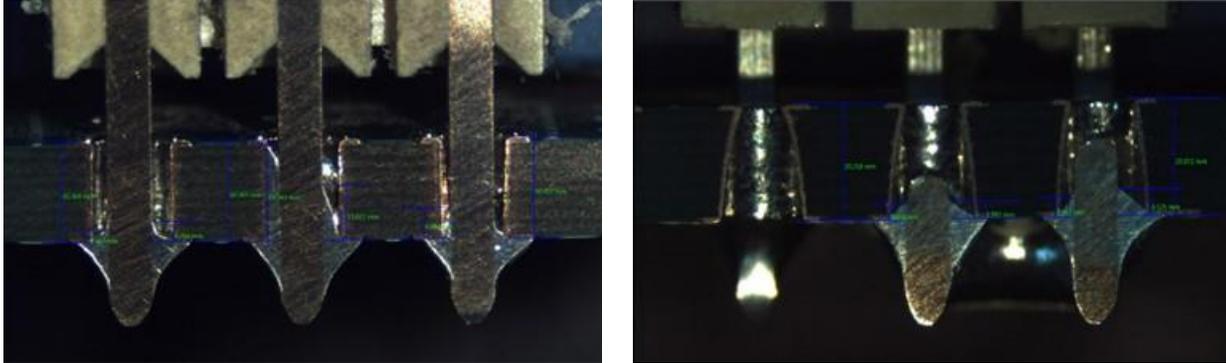
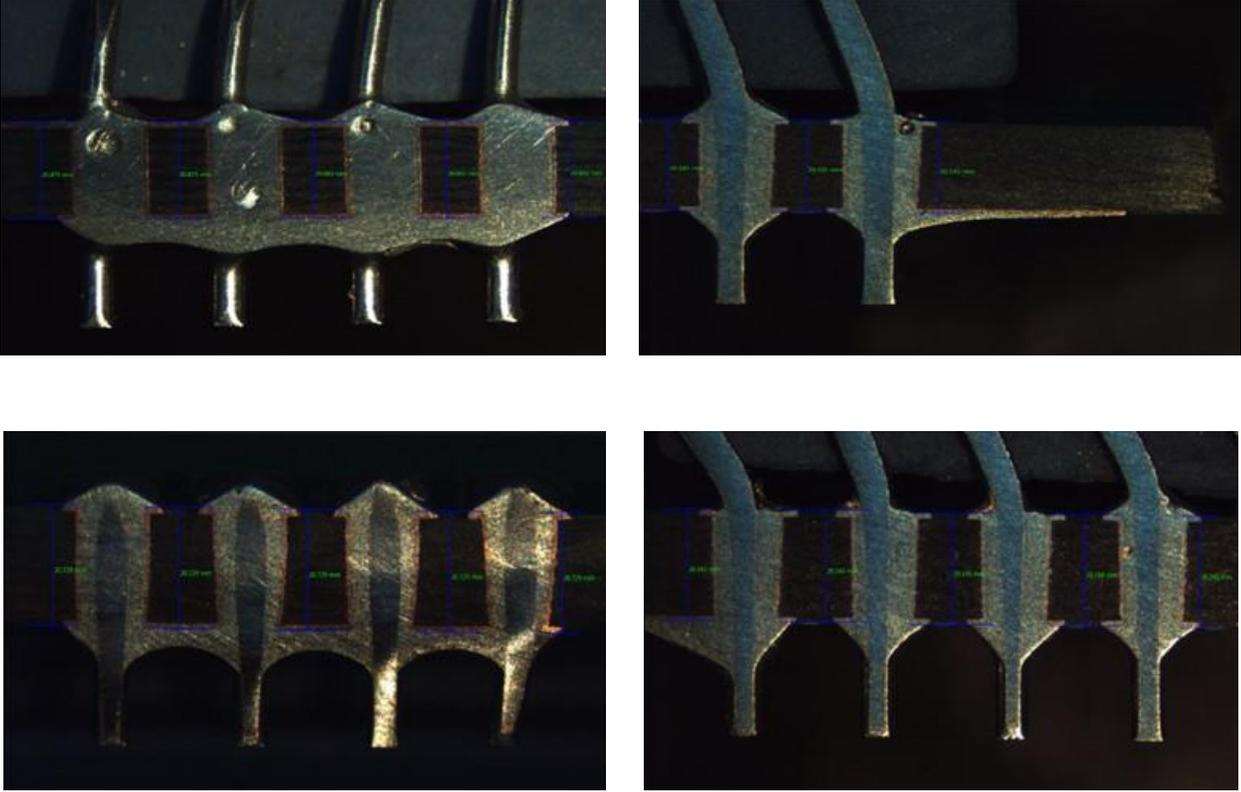
<p style="text-align: center;">Área De Conectores</p>		<p style="text-align: center;">Llenado no correcto</p>
		

Tabla 3. 10 Resultados de Corte pieza 4. Elaboración: Propia

Pieza Número 6	Secciones de corte	Resultado
<p>Área De Display</p>		<p>Llenado correcto con Voids⁸</p>

⁸ Void: Hueco en la soldadura, ver anexo 1.

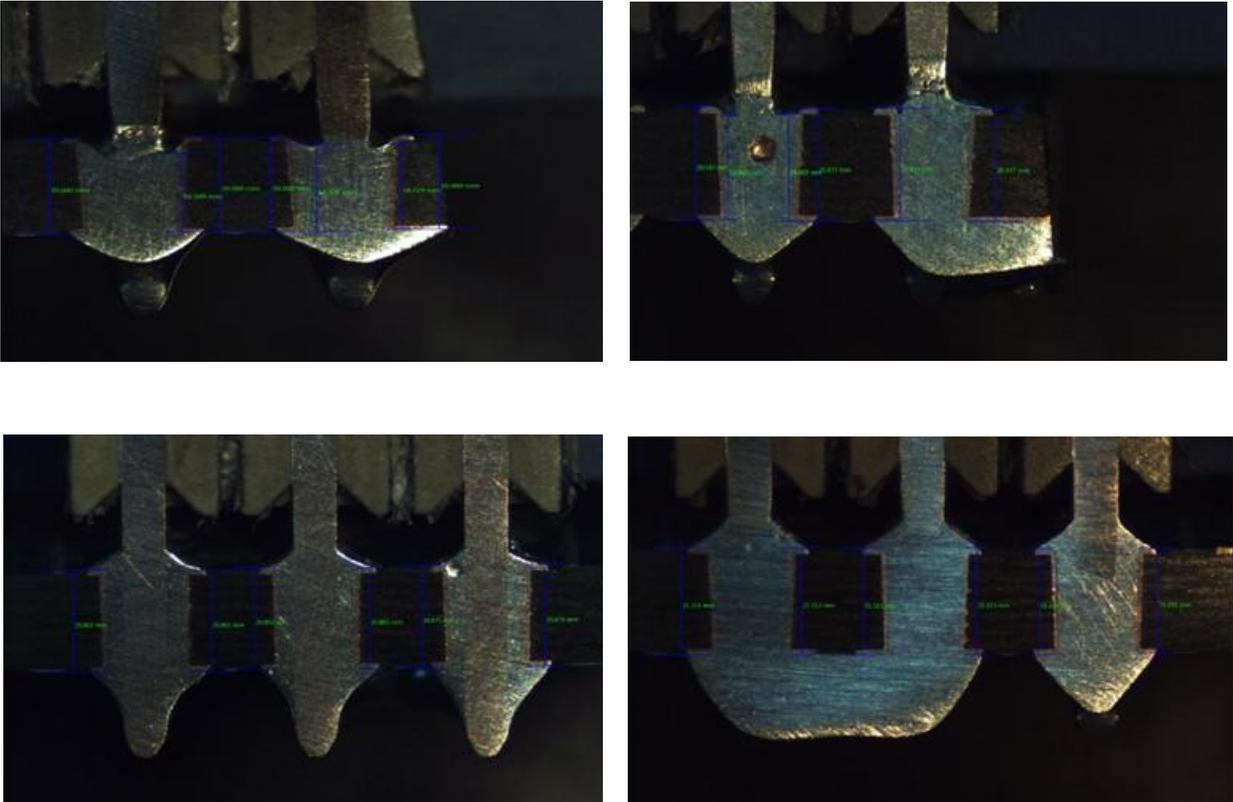
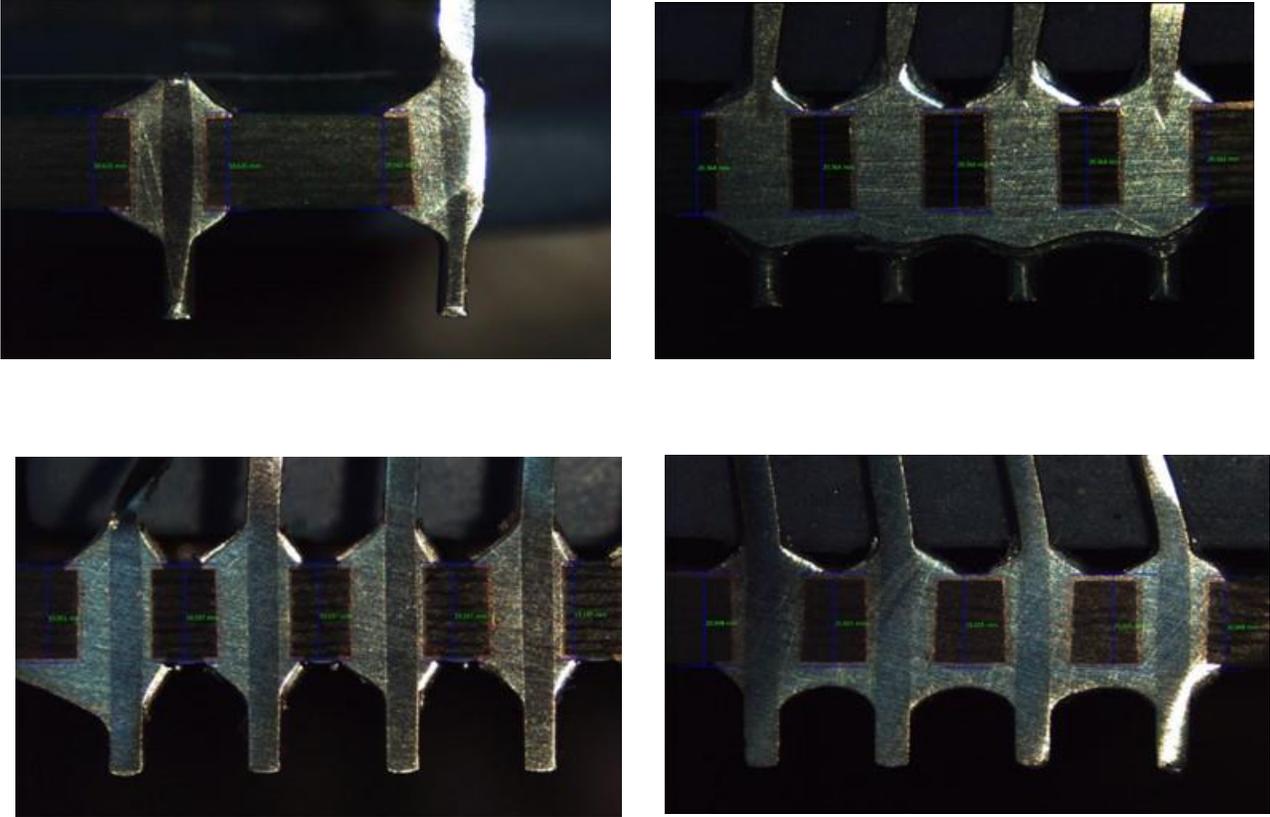
<p style="text-align: center;">Área De Conectores</p>		<p>Llenado correcto con Voids y cortos</p>
--	---	--

Tabla 3. 11 Resultados de Corte pieza 6. Elaboración: Propia

Pieza Número 8	Secciones de corte	Resultado
<p data-bbox="241 657 359 824">Área De Display</p>		<p data-bbox="1759 657 1877 743">Llenado correcto</p>

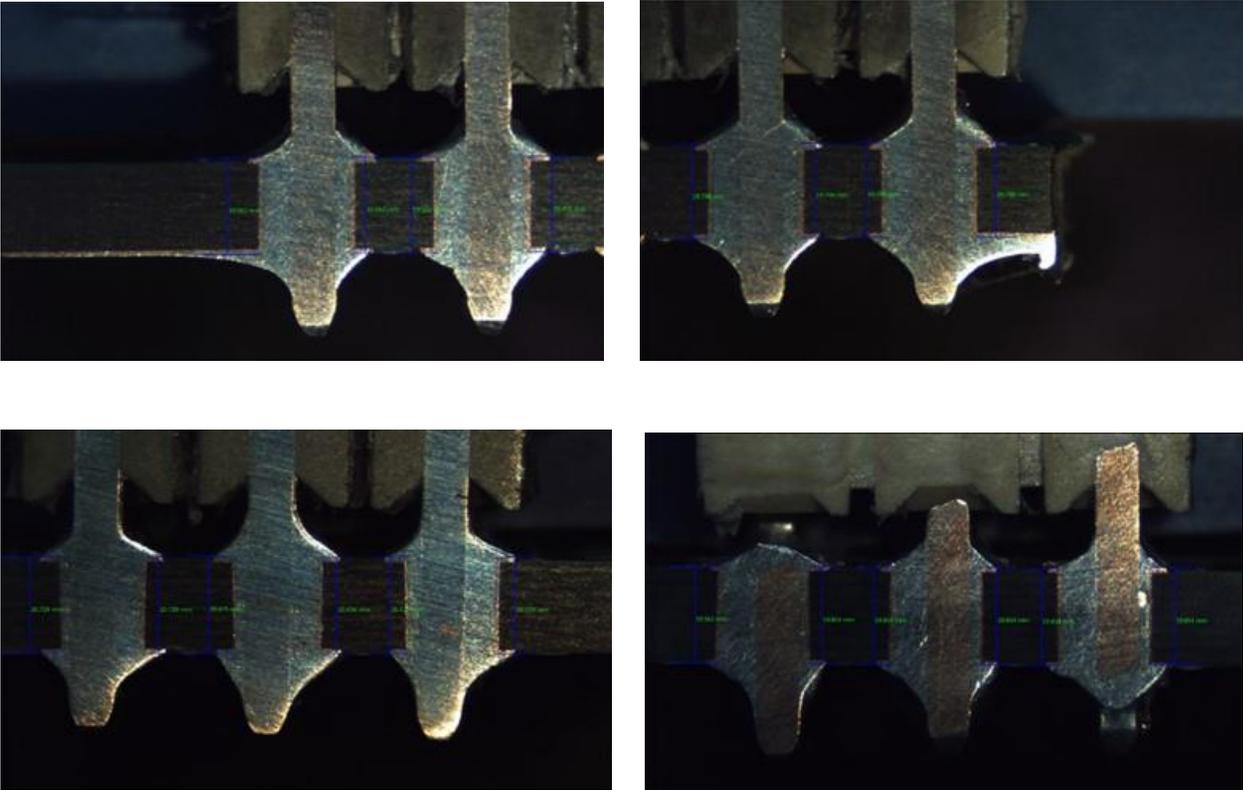
<p style="text-align: center;">Área De Conectores</p>		<p style="text-align: center;">Llenado correcto</p>
---	---	---

Tabla 3. 12 Resultados de Corte pieza 8. Elaboración: Propia

3.7 Análisis Estadístico (Modelo General)

Una vez realizado la experimentación y obtenido los resultados totales de fallas (ver tabla 3.9) se utilizó nuevamente el programa R Studio, dónde se complementó la matriz del experimento con la variable respuesta (cantidad de defectos totales).

```
> y<-c(13,6,2,15,8,7,5,0)
> ty<-data.frame(t1.opt$design,y)
```

A	B	C	D	E	Respuesta
1	2	2	2	2	13
1	1	2	1	1	6
2	2	1	1	2	2
1	2	1	2	1	15
2	1	2	2	2	8
2	1	1	2	1	7
1	1	1	1	2	5
2	2	2	1	1	0

Tabla 3. 13 Diseño optimizado con la variable de respuesta. Fuente: R Studio.

Después de haber agregado la variable respuesta a cada corrida experimental se realizó el estudio ANOVA considerando el modelo general de 5 factores siendo y nuestra variable respuesta (cantidad de defectos totales). Ver figura 3.15.

$$y = A + B + C + D + E$$

Figura 3.15 Modelo General. Fuente: Propia

```
> m1<-lm(y~A+B+C+D+E,data=ty)
```

Analysis of Variance Table

Response: y

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
A	1	60.5	60.50	48.4	0.02004 *
B	1	2.0	2.00	1.6	0.33333
C	1	0.5	0.50	0.4	0.59175
D	1	112.5	112.50	90.0	0.01093 *
E	1	2.0	2.00	1.6	0.33333
Residuals	2	2.5	1.25		

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3.7.1 Análisis de la significancia de los factores:

Factor A= Cantidad de Flux

H_0 = El factor A es significativo

H_A = El factor A no es significativo

$$Pval = 0.02004$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 la cantidad de flux es significativo

Factor B= Precaentado

H_0 = El factor B es significativo

H_A = El factor B no es significativo

$$Pval = 0.33333$$

$$Pval > 0.05$$

Dado que $Pval > 0.05$, se rechaza H_0 el precaentado no es significativo

Factor C= Altura de la Ola

H_0 = El factor C es significativo
 H_A = El factor C no es significativo

$$Pval = 0.59175$$
$$Pval > 0.05$$

Dado que $Pval > 0.05$, se rechaza H_0 la altura de la ola no es significativo

Factor D= Velocidad del conveyor

H_0 = El factor D es significativo
 H_A = El factor D no es significativo

$$Pval = 0.01093$$
$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 la velocidad del conveyor es significativo

Factor E= Temperatura de soldadura

H_0 = El factor E es significativo
 H_A = El factor E no es significativo

$$Pval = 0.33333$$
$$Pval > 0.05$$

Dado que $Pval > 0.05$, se rechaza H_0 la temperatura de soldadura no es significativo

3.7.2 Análisis de coeficientes y significancia del modelo:

> summary(m1)

Call:

lm.default(formula = y ~ A + B + C + D + E, data = ty)

Residuals:

```
 4  6 12 18 21 25 27 31
0.25 0.75 0.75 -0.25 -0.75 -0.25 0.25 -0.75
```

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	7.0000	0.3953	17.709	0.00317	**
A1	-2.7500	0.3953	-6.957	0.02004	*
B1	0.5000	0.3953	1.265	0.33333	
C1	0.2500	0.3953	0.632	0.59175	
D1	3.7500	0.3953	9.487	0.01093	*
E1	0.5000	0.3953	1.265	0.33333	

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.118 on 2 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9861, Adjusted R-squared: 0.9514
F-statistic: 28.4 on 5 and 2 DF, p-value: 0.03436

Análisis de coeficientes

Coeficiente A1

H_0 = El factor A1 es significativo

H_A = El factor A1 no es significativo

$$Pval = 0.02004$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 el coeficiente es significativo

Coeficiente D1

H_0 = El factor D1 es significativo

H_A = El factor D1 no es significativo

$$Pval = 0.01093$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 el coeficiente es significativo

Significancia del modelo

H_0 = El modelo es significativo

H_A = El modelo no es significativo

$$Pval = 0.03436$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 el modelo es significativo

3.7.3 R^2 Y $R^2_{AJUSTADA}$:

$$R^2 = 0.9861$$

$$R^2_{Ajustada} = 0.9514$$

El modelo se ajusta de manera correcta a los datos e un 95% si se revisa la R^2 Ajustada, por lo que se concluye que el modelo es confiable.

3.7.4 Residuales:

```
> plot(m1,c(1,2))
```

Hit <Return> to see next plot:

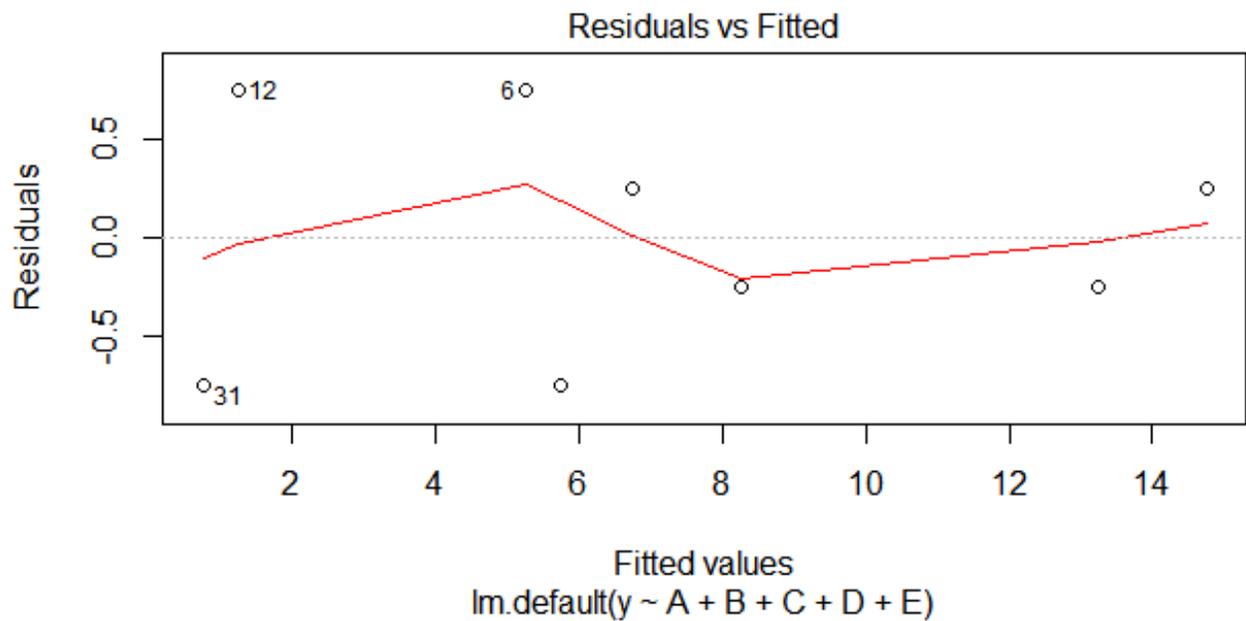


Figura 3.16. Gráfico de Residuales vs Valores ajustados. Fuente: R Studio

La gráfica de residuos contra valores ajustados muestra valores aleatorios por lo que concluimos que no existe un patrón visible entre ellos.

3.7.5 Normalidad:

Hit <Return> to see next plot:

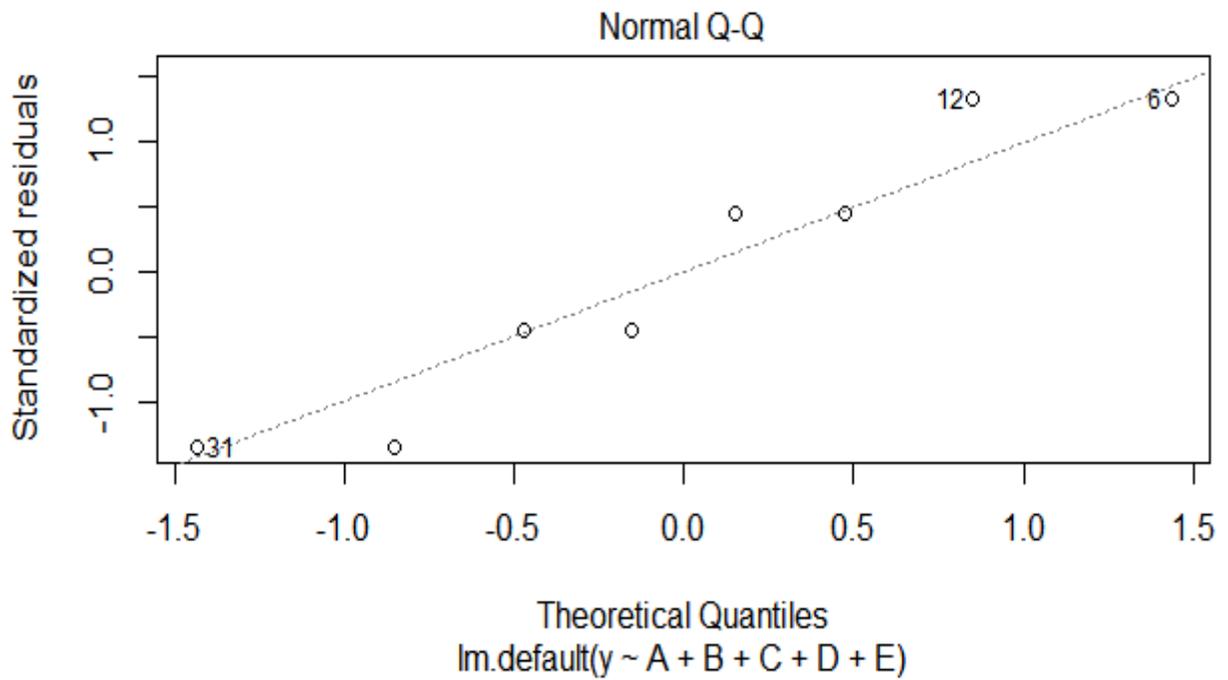


Figura 3.17. Gráfico de Normalidad. Fuente: R Studio

La gráfica muestra que los valores se ajustan a una línea recta, por lo que podemos concluir que los datos del estudio son normales.

3.7.6 Gráficas de efectos:

Tal cómo lo vimos en la significancia de los factores, los factores significativos para el modelo $y = A+B+C+D+E$, dónde y es la cantidad de defectos generados en el soldeo por ola, son los factores A y D, dónde A es la cantidad de flux y D es la velocidad del conveyor.

Tal lo indica la gráfica “A effect plot” dónde podemos observar que cuando estamos en el nivel 1 la cantidad de defectos es mayor que al estar en el nivel 2, por lo que es mejor trabajar el factor A en el nivel 2, en este caso es el nivel de mayor cantidad de flux.

En el caso del gráfico “D effect plot” el factor de velocidad de conveyor como vimos es el otro factor significativo, por lo que nos conviene tenerlo en el nivel bajo.

```
> library (effects)
```

```
> ef1<-allEffects(m1)
```

```
> plot(ef1)
```

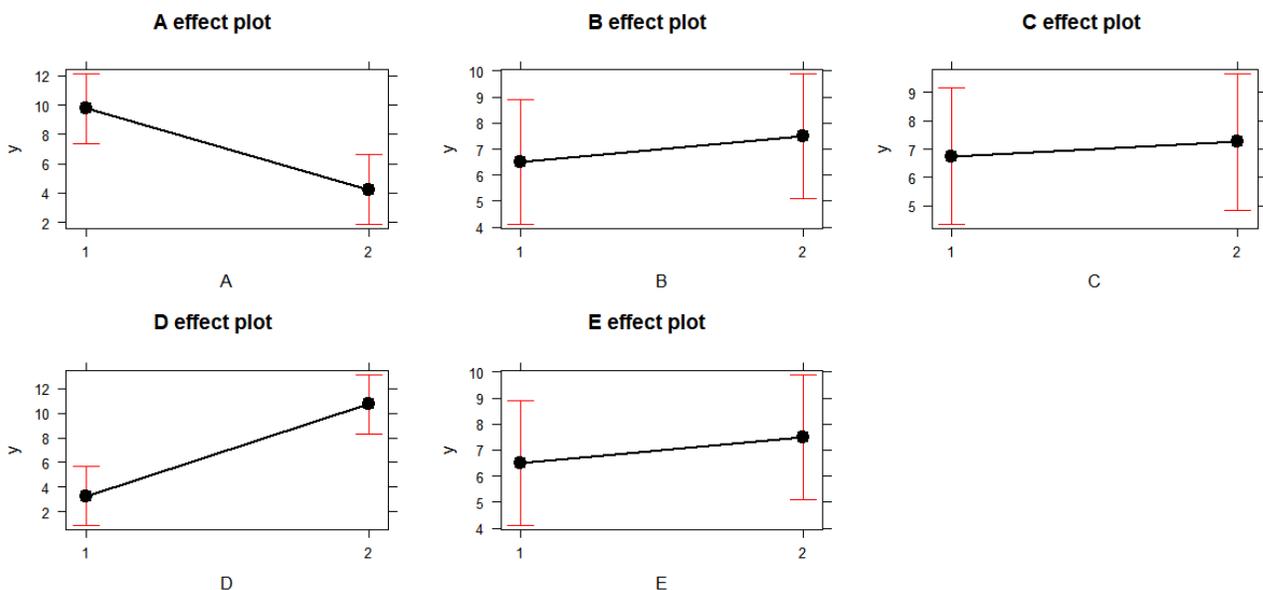


Figura 3.18. Gráfico de todos los efectos Modelo General. Fuente: R Studio

3.8 Análisis Estadístico (Modelo por defecto de cortos)

Este modelo tiene como finalidad observar y analizar aquellas variables que afectan significativamente a nuestro problema principal de cortos circuitos, aquí la variable respuesta sigue siendo la cantidad de defectos, sin embargo nos referimos sólo a los defectos relacionados con cortos circuitos. A continuación se presenta la ecuación utilizada para este análisis, es conveniente mencionar que se llegó a este modelo revisando cada una de las interacciones posibles hasta llegar a la más óptima siendo el modelo de la figura 3.19 la mejor.

$$y = A + B + C + D + A:C$$

Figura 3.19. Modelo para el defecto de cortos. Fuente: Propia

```
> m1<-lm(y~A+B+C+D+A:C,data=ty)
> anova(m1)
```

Analysis of Variance Table

Response: y

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	value	Pr(>F)
A	1	0.125	0.125	1	0.42265	
B	1	1.125	1.125	9	0.09547	.
C	1	10.125	10.125	81	0.01212	*
D	1	1.125	1.125	9	0.09547	.
A:C	1	0.125	0.125	1	0.42265	
Residuals	2	0.250	0.125			

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3.8.1 Análisis de la significancia de los factores:

Factor A= Cantidad de Flux

H_0 = El factor A es significativo

H_A = El factor A no es significativo

$$Pval = 0.42265$$

$$Pval > 0.05$$

Dado que $Pval > 0.05$, se rechaza H_0 la cantidad de flux no es significativo

Factor B= Precaentado

H_0 = El factor B es significativo

H_A = El factor B no es significativo

$$Pval = 0.09547$$

$$Pval > 0.05^*$$

* Dado que $Pval$ es cercado al 0.05 no se rechaza H_0 , el precalentado se toma como significativo para este experimento.

Factor C= Altura de la Ola

H_0 = El factor C es significativo

H_A = El factor C no es significativo

$$Pval = 0.01212$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 la altura de la ola es significativo

Factor D= Velocidad del conveyor

H_0 = El factor D es significativo

H_A = El factor D no es significativo

$$Pval = 0.09547$$

$$Pval > 0.05^*$$

*Dado que P_{val} es cercano al 0.05 no se rechaza H_0 , la velocidad del conveyor se toma como significativo para este experimento.

Interacción A:C= Cantidad de Flux: Altura de la Ola

H_0 = La interacción A:C es significativo

H_A = La interacción A:C no es significativo

$$P_{val} = 0.42265$$

$$P_{val} > 0.05$$

Dado que $P_{val} > 0.05$, se rechaza H_0 la interacción A:C no es significativo

3.8.2 Análisis de coeficientes y significancia del modelo:

> summary(m1)

Call:

lm.default(formula = y ~ A + B + C + D + A:C, data = ty)

Residuals:

	5	7	8	9	13	14	18	23
	-1.249e-16	2.500e-01	1.825e-16	2.500e-01	-2.500e-01	-1.020e-16	9.228e-17	-2.500e-01

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.875	0.125	15	0.00442 **
A1	-0.125	0.125	-1	0.42265
B1	-0.375	0.125	-3	0.09547 .
C1	-1.125	0.125	-9	0.01212 *
D1	0.375	0.125	3	0.09547 .
A1:C1	-0.125	0.125	-1	0.42265

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3536 on 2 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9806, Adjusted R-squared: 0.932

F-statistic: 20.2 on 5 and 2 DF, p-value: 0.04784

Análisis de coeficientes

Intercepción

H_0 = La intercepción es significativa

H_A = La intercepción no es significativo

$$Pval = 0.00442$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 la intercepción es significativa

Coeficiente B1

H_0 = El coeficiente B1 es significativo

H_A = El coeficiente B1 no es significativo

$$Pval = 0.09547$$

$$Pval > 0.05$$

* Dado que $Pval$ es cercano al 0.05 no se rechaza H_0 , el coeficiente B1 se toma como significativo para este experimento.

Coeficiente C1

H_0 = El coeficiente C1 es significativo

H_A = El coeficiente C1 no es significativo

$$Pval = 0.01093$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 el coeficiente es significativo

Coeficiente D1

H_0 = El factor D1 es significativo

H_A = El factor D1 no es significativo

$$Pval = 0.09547$$

$$Pval > 0.05^*$$

* Dado que $Pval$ es cercano al 0.05 no se rechaza H_0 , el coeficiente D1 se toma como significativo para este experimento.

Significancia del modelo

H_0 = El modelo es significativo

H_A = El modelo no es significativo

$$Pval = 0.04784$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 el modelo es significativo

3.8.3 R^2 Y $R^2_{AJUSTADA}$:

$$R^2 = 0.9806$$

$$R^2_{Ajustada} = 0.932$$

El modelo se ajusta de manera correcta a los datos e un 93% si se revisa la $R^2_{Ajustada}$, por lo que se concluye que el modelo es confiable.

3.8.4 Gráficas de efectos:

```
> ef1<-allEffects(m1)
```

```
> plot(ef1)
```

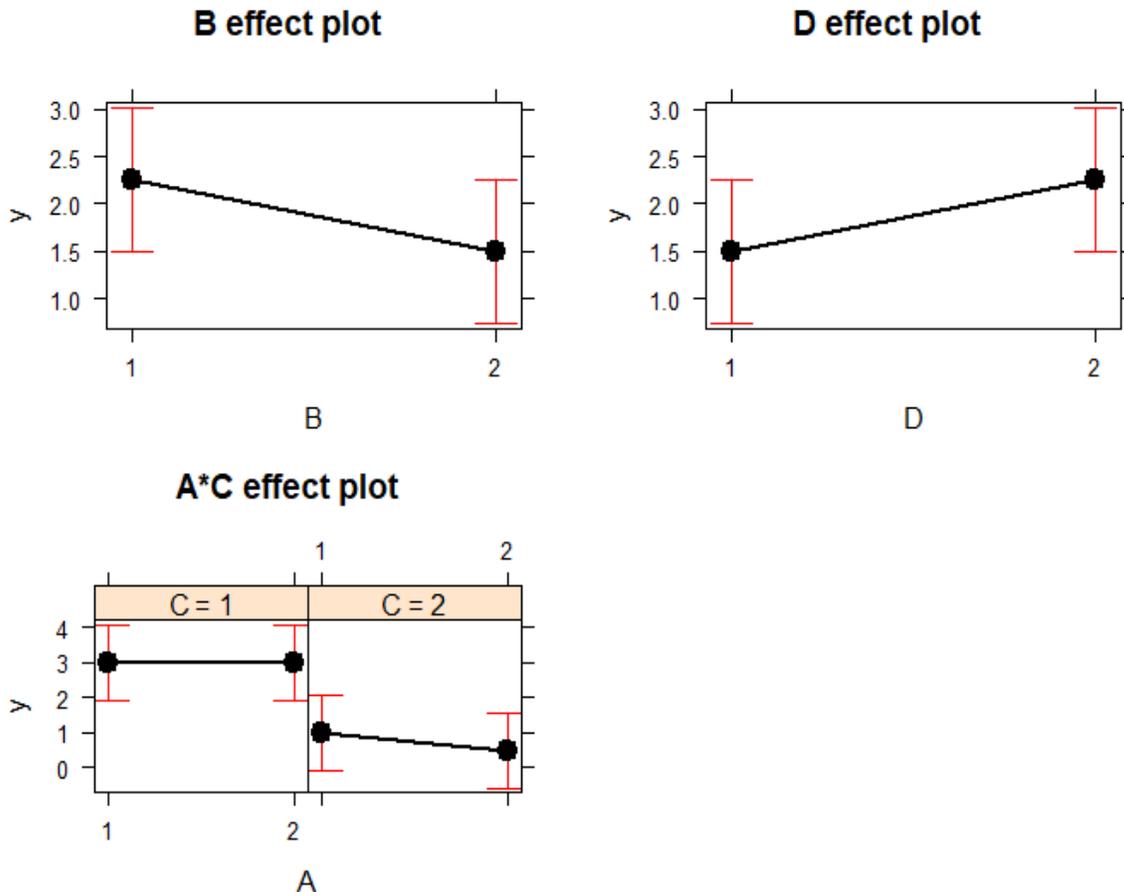


Figura 3.20. Gráfico de todos los efectos Modelo para el defecto de cortos. Fuente: R Studio

En la gráfica "B effect plot" observamos que el mejor nivel para este factor es el 2, dónde el precalentamiento es alto. Para el factor D "D effect plot" el nivel adecuado es en el 1, es decir, velocidad del conveyor bajo. En la gráfica "A*C effect plot" observamos que para que la interacción primeramente no es significativa y en segundo punto vemos que el factor A no influye en nuestra variable respuesta ya que no es significativo.

En la siguiente figura (3.21) observamos como el factor C si es significativo e influye en mi variable respuesta cantidad de defectos de cortos. Nos conviene tener este factor en su nivel alto para lograr obtener menos defectos.

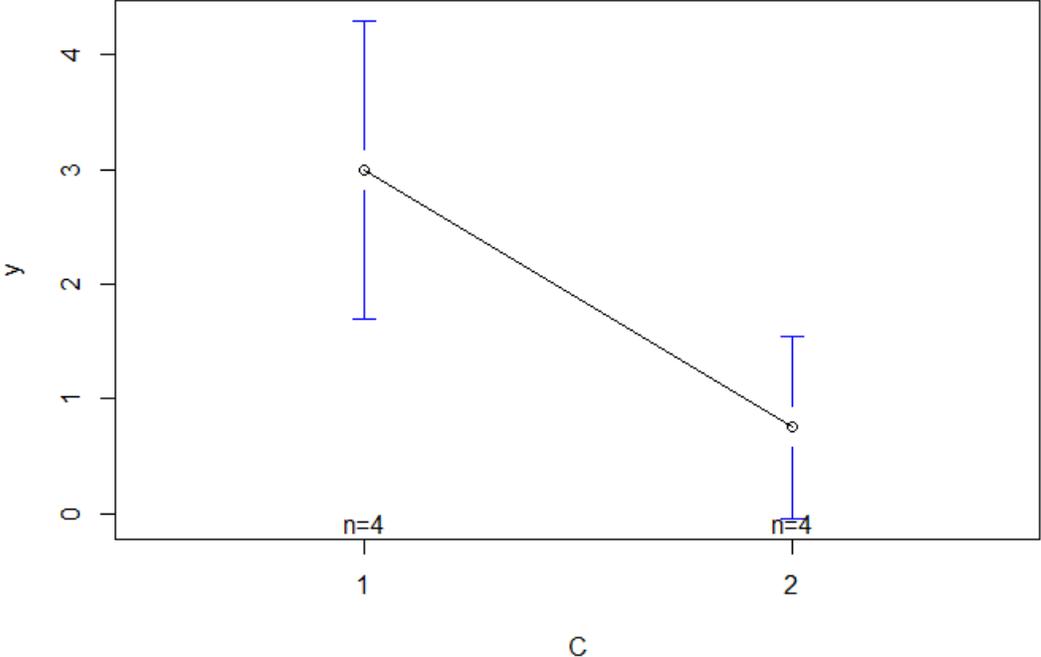


Figura 3.21. Gráfico Factor C en Modelo para el defecto de cortos. Fuente: R Studio

3.9 Análisis Estadístico (Modelo por defecto de faltantes de soldadura)

En el siguiente punto de estudio tiene el propósito de analizar aquellos factores que son significativos pero para el problema de faltantes de soldadura. A continuación se presenta el modelo para este estudio, que igual que el de cortos circuitos resultó de la revisión de todas las interacciones.

$$y = A + D$$

Figura 3.22. Modelo para el defecto de faltantes de soldadura. Fuente: Propia

```
> m1<-lm(y~A+D,data=ty)
> anova(m1)
```

Analysis of Variance Table

Response: y

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
A	1	21.125	21.125	4.4709	0.08812 .
D	1	21.125	21.125	4.4709	0.08812 .
Residuals	5	23.625	4.725		

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3.9.1 Análisis de la significancia de los factores:

Factor A= Cantidad de Flux

H_0 = El factor A es significativo

H_A = El factor A no es significativo

$$Pval = 0.08812$$
$$Pval > 0.05^*$$

*Dado que P_{val} es cercado al 0.05 no se rechaza H_0 , la cantidad de flux se toma como significativo para este experimento.

Factor D= Velocidad del conveyor

H_0 = El factor D es significativo

H_A = El factor D no es significativo

$$P_{val} = 0.08812$$

$$P_{val} > 0.05^*$$

*Dado que P_{val} es cercado al 0.05 no se rechaza H_0 , la velocidad del conveyor se toma como significativo para este experimento.

3.9.2 Análisis de coeficientes y significancia del modelo:

> summary(m1)

Call:

lm.default(formula = y ~ A + D, data = ty)

Residuals:

```
 5   7   8   9  13  14  18  23
3.375 0.875 -1.625 -2.375 0.625 -1.375 -0.375 0.875
```

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.3750	0.7685	3.090	0.0271 *
A1	-1.6250	0.7685	-2.114	0.0881 .
D1	1.6250	0.7685	2.114	0.0881 .

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.174 on 5 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.6414, Adjusted R-squared: 0.4979

F-statistic: 4.471 on 2 and 5 DF, p-value: 0.07702

Análisis de coeficientes

Intercepción

H_0 = La intercepción es significativa

H_A = La intercepción no es significativo

$$Pval = 0.0271$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 la intercepción es significativa

Coefficiente A1

H_0 = El coeficiente A1 es significativo

H_A = El coeficiente A1 no es significativo

$$Pval = 0.0881$$

$$Pval > 0.05^*$$

* Dado que $Pval$ es cercano al 0.05 no se rechaza H_0 , el coeficiente A1 se toma como significativo para este experimento

Coefficiente D1

H_0 = El factor D1 es significativo

H_A = El factor D1 no es significativo

$$Pval = 0.0881$$

$$Pval > 0.05^*$$

* Dado que $Pval$ es cercano al 0.05 no se rechaza H_0 , el coeficiente D1 se toma como significativo para este experimento

Significancia del modelo

H_0 = El modelo es significativo

H_A = El modelo no es significativo

$$Pval = 0.07702$$

$$Pval > 0.05^*$$

* Dado que $Pval$ es cercano al 0.05 no se rechaza H_0 , el modelo es significativo

3.9.3 R^2 Y $R^2_{AJUSTADA}$:

$$R^2 = 0.6414$$

$$R^2_{Ajustada} = 0.4979$$

El modelo se ajusta de manera correcta a los datos e un 50% si se revisa la R^2 Ajustada, por lo que se concluye que el modelo es explicativo pero difícilmente podríamos predecir la variable respuesta.

3.9.4 Gráficas de efectos:

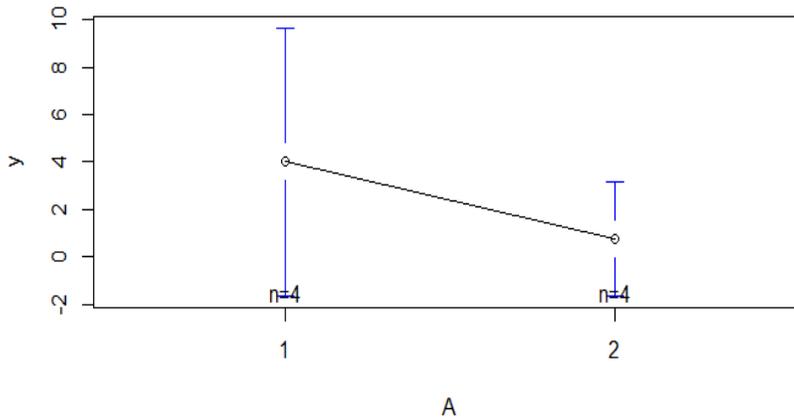


Figura 3.23. Gráfica de efectos Factor A para de faltantes de soldadura. Fuente: R Studio

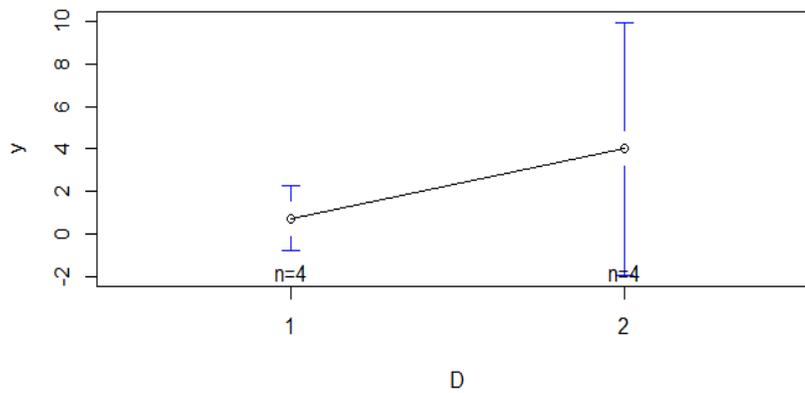


Figura 3.24. Gráfica de efectos Factor D para de faltantes de soldadura. Fuente: R Studio

La gráfica 3.23 muestra que para el problema de faltantes de soldadura el nivel recomendado para el Factor A, cantidad de flux, es el nivel alto. En cuanto al factor D en la gráfica 3.24 observamos que es claro que el nivel recomendado es el nivel bajo.

3.10 Análisis Estadístico (Modelo por defecto de filete incorrecto)

El siguiente análisis tiene como objetivo revisar aquellos factores que están influyendo en la variable respuesta cantidad de defectos de filete incorrecto, los resultados experimentales fueron ingresado en el programa R Studio para su análisis, ver la columna de filete incorrecto en la tabla 3.9.

El la figura 3.25 se observa el modelo para la variable respuesta filete incorrecto.

$$y = A + C + D$$

Figura 3.25. Modelo para el defecto de filete incorrecto. Fuente: Propia

```
> m1<-lm(y~A+C+D,data=ty)
```

```
> anova(m1)
```

Analysis of Variance Table

Response: y

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
A	1	8.0	8.000	3.7647	0.12434
C	1	12.5	12.500	5.8824	0.07234 .
D	1	24.5	24.500	11.5294	0.02739 *
Residuals	4	8.5	2.125		

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3.10.1 Análisis de la significancia de los factores:

Factor A= Cantidad de Flux

H_0 = El factor A es significativo

H_A = El factor A no es significativo

$$Pval = 0.12434$$

$$Pval > 0.05$$

Dado que $Pval > 0.05$, se rechaza H_0 la cantidad de flux no es significativo

Factor C= Altura de la Ola

H_0 = El factor C es significativo

H_A = El factor C no es significativo

$$Pval = 0.07234$$
$$Pval > 0.05^*$$

*Dado que $Pval$ es cercado al 0.05 no se rechaza H_0 , la altura de ola se toma como significativo para este experimento.

Factor D= Velocidad del conveyor

H_0 = El factor D es significativo

H_A = El factor D no es significativo

$$Pval = 0.02739$$
$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 la velocidad del conveyor es significativo

3.10.2 Análisis de coeficientes y significancia del modelo:

> [summary\(m1\)](#)

Call:

lm.default(formula = y ~ A + C + D, data = ty)

Residuals:

5 7 8 9 13 14 18 23
-1.25 -1.25 1.25 0.75 -0.75 0.75 -0.75 1.25

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.7500	0.5154	5.336	0.00594 **
A1	-1.0000	0.5154	-1.940	0.12434
C1	1.2500	0.5154	2.425	0.07234 .
D1	1.7500	0.5154	3.395	0.02739 *

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.458 on 4 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.8411, Adjusted R-squared: 0.722
F-statistic: 7.059 on 3 and 4 DF, p-value: 0.04474

Análisis de coeficientes

Intercepción

H_0 = La intercepción es significativa
 H_A = La intercepción no es significativo

$$Pval = 0.00594$$
$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 la intercepción es significativa

Coeficiente C1

H_0 = El coeficiente C1 es significativo
 H_A = El coeficiente C1 no es significativo

$$Pval = 0.07234$$
$$Pval > 0.05$$

* Dado que $Pval$ es cercano al 0.05 no se rechaza H_0 , el coeficiente C1 se toma como significativo para este experimento

Coeficiente D1

H_0 = El factor D1 es significativo
 H_A = El factor D1 no es significativo

$$Pval = 0.02739$$
$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 la velocidad del conveyor es significativa

Significancia del modelo

H_0 = El modelo es significativo

H_A = El modelo no es significativo

$$Pval = 0.04474$$

$$Pval < 0.05$$

Dado que $Pval < 0.05$, se acepta H_0 el modelo es significativo

3.10.3 R^2 Y $R^2_{AJUSTADA}$:

$$R^2 = 0.8411$$

$$R^2_{Ajustada} = 0.722$$

El modelo se ajusta de manera correcta a los datos e un 72% si se revisa la R^2 Ajustada, por lo que se concluye que el modelo es confiable.

3.10.4 Gráficas de efectos:

```
> ef1<-allEffects(m1)
```

```
> plot(ef1)
```

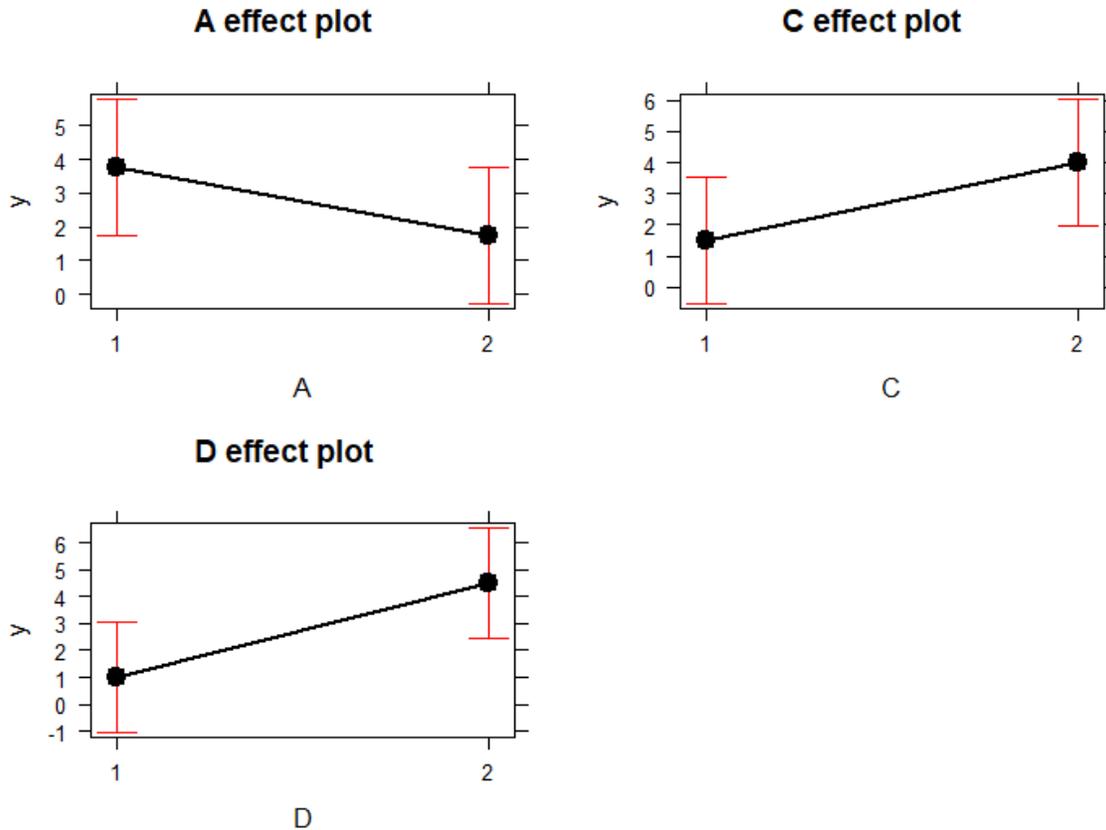


Figura 3.26. Gráfico de todos los efectos para Modelo de defecto de filete incorrecto.

Fuente: R Studio

En la gráfica “ A effect plot” nos muestra como el factor A nos conviene manejarlo en un nivel alto, para el factor C la gráfica “C effect plot” nos muestra que el nivel bajo es más adecuado, para el factor D se observa en la gráfica “ D effect plot” que el nivel adecuado para este factor es el nivel bajo.

3.11 Corrida de confirmación (validación del modelo)

De todo el análisis estadístico realizado con cada uno de los modelos (cortos, faltantes de soldadura y filete incorrecto) se determinaron los niveles a utilizar en nuestra corrida de confirmación. Para representarlo de manera gráfica se realizó la siguiente tabla:

Factor	Nivel Recomendado			Nivel final de factor
	Modelo de cortos	Modelo de faltante de soldadura	Modelo de filete incorrecto	
A	Alto	Alto	Alto	Alto
B	Alto	---	---	Alto
C	Alto	---	Bajo	Alto
D	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
E	Factor No significativo en ningún modelo			Bajo

Tabla 3. 14 Niveles recomendados para cada factor

Para el factor C se determinó que el nivel a utilizar debía ser el Alto, ya que nuestro problema principal a solucionar son los cortos circuitos y para este factor en la variable de respuesta cantidad de defectos de cortos el nivel recomendable es el alto. Para el factor E al no ser significativo no afecta el nivel en el que esté, sin embargo para la corrida de confirmación se usa el bajo que es el nivel normalmente utilizado en el área de producción.

Para llevar a cabo la corrida de confirmación del modelo se tomaron un total de 10 tarjetas electrónicas dónde se repetiría en cada una de ellas la siguiente receta; Factor A en su nivel alto (50ml/min), Factor B en su nivel alto (Alto), Factor C en su nivel alto (550 rpms), Factor D en su nivel bajo (0.8 m/min) y el Factor E en su nivel bajo (260°C).

Las 10 unidades se pasaron por el proceso de soldeo por ola y a continuación se presentan los resultados de nuestra corrida de confirmación:

Pieza	Cant. De defectos Cortos	Cant. De defectos Faltante soldadura	Cant. De defectos Filete incorrecto
1	1	0	0
2	1	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	1	0	0
7	1	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	1	0	0

Tabla 3. 15 Resultados corrida de confirmación. Fuente: Propia

De los resultados concluimos que se logró que al menos en el 50% de las piezas no se tuvieran defectos. Es importante comentar que en el proceso actual 100% de las unidades presenta cortos circuitos.

3.12 Proyecciones de ahorros económicos

Con estos resultados de una reducción de 50% de unidades libre de defecto se realizó una proyección de ahorros económicos esperados para el 2018 como resultado de la aplicación de esta experimentación. De la tabla 3.5 dónde se revisó que en el año 2016 se tuvo costo anual de \$609,706.49 y con una reducción potencial del 50% se tiene un costo anual de \$304,853.25, proyectado al 2018 con un total de 6,000,000 de unidades a vender se obtiene que hay un ahorro estimado de \$460,967.376 anuales para el siguiente año.

3.13 Propuesta de estandarización

Para llegar a un proceso estandarizado dónde la asignación de parámetros no sea cuestión de azar es necesario contemplar la siguiente metodología:

- 1.- Realizar un estudio preliminar del producto a ser introducido en el área de producción considerando tipo de material de PCB y los componentes through hole a ensamblarse dentro de la tarjeta realizando un perfilado inicial en la línea dónde se pretende ensamblar un producto para asegurar una correcta activación de flux y calentamiento adecuado.
- 2.-Una vez determinando el perfil de línea adecuado para la tarjeta, realizar una corrida inicial experimental de 8 corridas considerando los siguientes factores, Cantidad de Flux, Precalentamiento, Altura de Ola y Velocidad del conveyor, Cada uno en 2 niveles alto y bajo.
- 3.-Realizar un modelo estadístico por tipo de defecto resultante de la experimentación y validar cada modelo considerando la significancia de los factores,

significancia de los factores, significancia del modelo, R^2 Y R^2 Ajustada y análisis de normalidad y residuos.

4.- Analizar los resultados del punto 3 y determinar la significancia de los factores y los niveles adecuados para cada factor.

5.-Realizar una corrida de confirmación.

6.- Documentar los resultados del desarrollo experimental en el amef, de tal manera que sea visible los potenciales modos de falla de un no correcto uso de los parámetros establecidos. Ver figura 3.27 cómo referencia.

No.	Process	Potential Failure Mode	Classification	Potential Effect(s) of Failure	Severity	Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure	Current Process Controls Prevention	Occurrence	Current Process Controls Detection	Detect	RPN
0701	Aplicación de Flux	Faltante de Soldadura		Falso contacto entre componentes	7	Parámetros incorrectos de Flux	Hoja de Parámetros Línea 1 D1-0025	2	Inspección visual fin de línea Equipo de prueba	7	98
0702	Pre calentamiento de PCBs	Cortos de Soldadura		Perdida de la función de conexión entre PCB y componentes	7	Parámetros incorrectos de pre calentamiento	Hoja de Parámetros Línea 1 D1-0026 Hoja de Parámetros D-1-0026 Limpieza de Pot	2	Inspección visual fin de línea Equipo de prueba	7	98
0703	Soldeo por Ola	Cortos de Soldadura		Perdida de la función de conexión entre PCB y componentes	7	Parámetros incorrectos altura de Ola	Hoja de Parámetros Línea 1 D1-0027 Hoja de Parámetros D-1-0026 Limpieza de Pot	2	Inspección visual fin de línea Equipo de prueba	7	98
		Cortos de Soldadura		Perdida de la función de conexión entre PCB y componentes	7	Parámetros incorrectos de velocidad de coneyor	Hoja de Parámetros Línea 1 D1-0025	2	Inspección visual fin de línea Equipo de prueba	7	98
		Filete de soldeo no correcto		Falso contacto entre componentes	7	Parámetros incorrectos de velocidad de coneyor	Hoja de Parámetros Línea 1 D1-0026	2	Inspección visual fin de línea Equipo de prueba	7	98

Figura 3.27. Ejemplo de documentación de potenciales modos de falla en amef. Fuente: Propia

4. RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

4.1 Resultados

Modelo General

- Del modelo general se concluye que los factores significativos son el factor A (cantidad de flux) y D (velocidad del conveyor).
- Derivado del modelo general para realizar una corrida de comprobación se determina que es necesario realizar un análisis exhaustivo de cada tipo de defecto para poder concluir cada factor y nivel de manera correcta.
- El modelo general muestra que nuestros datos provienen de una distribución normal y que los residuos no presentan algún patrón.

Modelo de defectos de cortos

- Para el modelo generado para la variable respuesta de defectos de cortos circuitos concluimos que el Factor B (precalentamiento), factor C (Altura de Ola) y Factor D (Velocidad de conveyor) son factores significativos que van influir en nuestra variable de respuesta.
- Para el modelo de defectos de cortos la interacción A:C y el Factor A (cantidad de flux) resultaron ser no significativos.
- Los factores significativos para el modelo de cortos se recomienda dejarlos en los siguientes niveles; Factor B se recomienda dejarlo en su nivel alto, Factor C en el nivel alto, Factor D en su nivel bajo y para el Factor A a pesar de mostrar no significancia se recomienda en el nivel alto puesto que hay algún punto que ayuda a disminuir la cantidad de cortos circuitos.
- Para este modelo concluimos que el Factor E (temperatura de soldadura) no es significativo ya que al momento de realizar el análisis en R no logró aparecer en nuestro modelo de estudio puesto que fue eliminado por no aportar valor a nuestro modelo.

Modelo de defectos de faltantes de soldadura

- Para el modelo relacionado a los faltantes de soldadura se concluye que los factores significativos son A (cantidad de flux) y D (velocidad del conveyor).
- El factor A se recomienda tenerlo en su nivel alto mientras que para el factor D lo recomendable es tenerlo en su nivel bajo.

Modelo de defectos de filetes incorrectos

- Para el modelo de la variable respuesta cantidad de defectos de filete incorrecto se determinó que el factor C (altura de Ola) y factor D (Velocidad del conveyor) son significativos para la variable de respuesta.
- El factor A (Cantidad de flux) resultó no ser significativo.
- Los niveles recomendables de nuestros factores son; para el factor C lo recomendable para disminuir la cantidad de defectos de filete incorrecto es dejar el factor en su nivel bajo, para el factor D lo recomendable es el nivel bajo.

Corrida de confirmación

- Para la corrida de confirmación se utilizaron los 5 factores, donde el factor A se determinó que el mejor nivel para la cantidad de flux debe ser el alto, el factor de precalentamiento el alto, la altura de Ola en nivel alto, la velocidad del conveyor en nivel bajo y el factor de temperatura de soldadura en bajo. Como se comentó en el análisis estadístico se determina que el Factor C (Altura de Ola) debe correr en su nivel alto derivado que en el problema de cortos y faltantes de soldadura ese es un nivel recomendable, y en el faltante de soldadura este factor es significativo.

A=Flux:	50 ml/min
B=Precautado:	Alto
C=Altura de Ola:	550 rpms
D=Velocidad de Conveyor:	0.8 m/min
E=Temperatura Soldadura:	260°C

Tabla 4. 1 Niveles de factores recomendados. Fuente: propia.

- Como resultado de la corrida experimental se obtiene que con el diseño de experimentos se espera reducir al menos el 50% las unidades defectuosas por problemas de cortos circuitos.
- Los defectos de faltante de soldadura y filete no correcto no se presentan en nuestra corrida experimental, quedando así sólo el defecto de cortos reducido en un 50% en unidades.

5. CONCLUSIONES

1.- De acuerdo la hipótesis planteada con el presente trabajo logramos comprobar que efectivamente si se controlan las variables cantidad de *flux*, velocidad del *conveyor*, precalentamiento y altura de la ola se puede reducir la cantidad de defectos en la máquina de soldeo por ola.

2.-Mediante nuestra experimentación determinamos que la temperatura del pot o también llamada temperatura de soldadura no afecta significativamente a la reducción de defectos en el soldeo por ola, por lo que para la estandarización de la metodología de mejora este factor no forma parte de la experimentación.

2.- Una de nuestras preguntas de investigación fue si realmente la altura de ola lograba reducir la cantidad de defectos en el soldeo, y contestando a esta pregunta, efectivamente puede reducir la cantidad de defectos, sin embargo tal como lo vimos en nuestro estudio estadístico no es la única variable asociada a la mejora de la reducción de defectos generados, ya que tanto el precalentamiento, velocidad de conveyor y cantidad de flux son significativos.

3.- Del estudio presentado cuando se determinó un modelo por tipo de defecto comprendimos que algunos factores son significativos para un defecto y otros pueden no serlo. De ahí la necesidad de realizar un estudio más profundo y determinar qué factores serán tomados en cuenta y sobre todo en que niveles, ya que si solo nos enfocamos a eliminar un solo defecto la respuesta será que aparecerán otro tipo de defectos en nuestra pieza

4.- Derivado de que en nuestra corrida de confirmación logramos identificar que efectivamente se puede lograr una mejora, sólo que el porcentaje inicial propuesto fue de un 10%, actualmente confirmamos que podemos lograr una mejora hasta del 50% siguiendo una correcta metodología.

5.-A través de nuestra experimentación logramos una reducción significativa de la cantidad de defectos, esta experimentación queda descrita en una propuesta para llevarla a la estandarización para que los parámetros no sean elegidos al azar.

6.- Para el desarrollo de futuros proyectos queda constatado que no puede ser un motivo la falta de recursos para no llevar a cabo la experimentación de manera adecuada, puesto que con una corrida de 8 pruebas experimentales logramos iniciar un buen análisis y con una corrida experimental de 10 unidades logramos corroborar nuestro modelo.

6. REFERENCIAS

- Abdul Aziz, M. S., Abdullah, M. Z., & Khor, C. Y. (2014). Influence of PTH offset angle in wave soldering with thermal-coupling method. *Soldering and Surface Mount Technology*, 26(3). <https://doi.org/10.1108/SSMT-08-2013-0021>
- Abdul Aziz, M. S., Abdullah, M. Z., Khor, C. Y., & Che Ani, F. (2013). Influence of pin offset in PCB through hole during wave soldering process. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 48, 116–123.
- Abdul Aziz, M. S., Abdullah, M. Z., Khor, C. Y., Mazlan, M., Iqbal, a. M., & Fairuz, Z. M. (2015). A computational fluid dynamics analysis of the wave soldering process. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 25(5), 1231–1247. <https://doi.org/10.1108/HFF-02-2014-0053>
- Abtew, M., & Selvaduray, G. (2000). Lead-free solders in microelectronics. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 27(5), 95–141. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(00\)00010-3](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00010-3)
- Adams, K. M., Anderson, J. E., & Graves, Y. B. (1994). Ionograph Sensitivity to Chemical Residues from “No Clean” Soldering Fluxes: Comparison of Solvent Extract Conductivity and Surface Conductivity. *Circuit World*, 20(2), 41–44.
- Andersson, C., Andersson, D. R., Tegehall, P. E., & Liu, J. (2007). Effect of different temperature cycling profiles on the crack initiation and propagation of Sn-3.5Ag wave soldered solder joints. *Microelectronics Reliability*, 47(2–3), 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2006.09.014>
- Andonova, A., Dinkova, N., & Marinov, I. (2006). Wave Soldering Quality Improvement by Design of Experiment Approach. *Electronics*, 20–22.
- Arra, M., Shangguan, D., Yi, S., Thalhammer, R., & Fockenberger, H. (2002). Development of lead-free wave soldering process. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 25(4), 289–299.

<https://doi.org/10.1109/TEPM.2002.807731>

Chinnam, R. K., Fauteux, C., Neuenschwander, J., & Janczak-Rusch, J. (2011). Evolution of the microstructure of Sn-Ag-Cu solder joints exposed to ultrasonic waves during solidification. *Acta Materialia*, 59(4), 1474–1481. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.11.011>

Conseil, H., Stendahl Jellesen, M., & Ambat, R. (2014). Contamination profile on typical printed circuit board assemblies vs soldering process. *Soldering & Surface Mount Technology*, 26(4), 194–202. <https://doi.org/10.1108/SSMT-03-2014-0007>

de Kluizenaar, E. E. (1998). Surface oxidation of molten soft solder: An Auger study. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1(3), 1480. <https://doi.org/10.1116/1.572173>

Dusek, M., Szendiuch, I., Bulva, J., & Zelinka, M. (2016). Wettability-SnPb and Lead free.pdf.

Geiger, D., & Shangguan, D. (2005). Investigation of the effect of solder flux residues on RF signal integrity using real circuits. *Soldering & Surface Mount Technology*, 17(4), 27–32.

Goosey, M. (2005). Soldering considerations for lead-free printed circuit board assembly – an Envirowise Guide. *Circuit World*, 31(3), 40–44. <https://doi.org/10.1108/03056120510585063>

Harrison, M. R., Vincent, J. H., & Steen, H. A. H. (2001). Lead-free reflow soldering for electronics assembly. *Soldering & Surface Mount Technology*, 13(3), 21–38. <https://doi.org/10.1108/09540910110407388>

Jellesen, M. S., Minzari, D., Rathinavelu, U., Møller, P., & Ambat, R. (2010). Corrosion failure due to flux residues in an electronic add-on device. *Engineering Failure Analysis*, 17(6), 1263–1272. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.02.010>

- Liukkonen, M., Havia, E., Leinonen, H., & Hiltunen, Y. (2011). Quality-oriented optimization of wave soldering process by using self-organizing maps. *Applied Soft Computing*, 11(1), 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.11.011>
- Ma, L., Xu, G., Sun, J., Guo, F., & Wang, X. (2011). Effects of Co additions on electromigration behaviors in Sn-3.0 Ag-0.5 Cu-based solder joint. *Journal of Materials Science*, 46(14), 4896–4905. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5401-3>
- Mhd Noor, E. E., Mhd Nasir, N. F., & Idris, S. R. A. (2016). A review: lead free solder and its wettability properties. *Soldering & Surface Mount Technology*, 28(3), 125–132. <https://doi.org/10.1108/SSMT-08-2015-0022>
- Mulugeta, A., & Guna, S. (2000). Engineering Lead-free Solders in Microelectronic. *Materials Science and Engineering*, 27, 95–106.
- Paredes Heller, J. J., & Valle, E. (2012). Reducción de Defectos en el Proceso de Soldadura por Ola de Componentes Electrónicos, 1(1), 21–43.
- Stoneman, A. M., Mackay, C. A., & Thwaites, C. J. (2013). Oxidation and drossing of molten solders: effects of impurities. *Metals Technology*, 7(1), 226–231.
- Strauss, R. (1998). SMT Soldering Handbook. *SMT Soldering Handbook*, 6–19. <https://doi.org/10.1016/B978-075063589-9/50004-7>
- Suganuma, K. (2001). Advances in lead-free electronics soldering. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 5(1), 55–64. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(00\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(00)00036-X)
- Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2013). Influence of sodium chloride and weak organic acids (flux residues) on electrochemical migration of tin on surface mount chip components. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 48(6), 426–435. <https://doi.org/10.1179/1743278213Y.0000000078>
- Verdingovas, V., Stendahl Jellesen, M., & Ambat, R. (2015). Relative effect of solder

flux chemistry on the humidity related failures in electronics. *Soldering & Surface Mount Technology*, 27(4), 146–156. <https://doi.org/10.1108/SSMT-11-2014-0022>

Wu, C. M. L., Yu, D. Q., Law, C. M. T., & Wang, L. (2004). Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 44(1), 1–44. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.01.001>

Zeng, K., & Tu, K. N. (2002). Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 38, 55–105. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00007-4)

ANEXOS

Anexo 1. Manual Alpha 2011

Bridging

Definition: The unwanted formation of a conductive path of solder between conductors.

Primary process set-up areas to check

- Conveyor speed too slow or other incorrect solder wave settings
- Time over preheat is too long causing the flux to be burned off
- Dwell time too long causing the flux to burn off before exiting the wave
- Topside board temp too low
- Not enough flux applied or the flux activity is too low

Other things to look for in the Process

- Solder temp too low
- Pre-heat too high
- Excess Flux blow-off
- Solder wave height high
- Pre-heat too low
- Board not seated properly
- Solder wave height low
- Contaminated flux
- Board pallet too hot
- Solder wave uneven
- Flux SP GR too low
- Conveyor speed high
- Solder contaminated
- Flux applied unevenly
- Conveyor speed low
- Flux not making contact

Other things to look for with the Assembly

- Board contamination
- Component lead length too long
- Component
- Improper board handling contamination

Other things to look for with the PC FAB

- Board oxidized
- Defective mask material
- Board contaminated

Other things to look for with the Board Design

- Poor pallet design
- Internal ground plane
- Component orientation
- Lead-to-hole ratio • Weight distribution

Excessive Solder

Definition: Occurs when a printed circuit board passing through a soldering process takes with it excessive solder.

Primary process set-up areas to check

- Conveyor speed too fast
- Dwell time too short
- Not enough flux or flux is not active enough
- Solder temperature too low

Other things to look for in the Process

- Solder temp too low
- Flux foamhead too low
- Excess flux blow-off
- Solder wave height high
- Flux not making contact
- Board pallet too hot
- Solder contaminated
- Flux applied unevenly
- Conveyor speed high
- Defective fixture

Other things to look for with the Assembly

- Component lead length too long

Things to look for with the PC FAB

- Defective mask material

Things to look for with the board design

- Component / board
- Lead length to pad
- Component layout or solderability ratio incorrect orientation
- Poor pallet design

Insufficient Solder Topside Fillet

Definition: Where the joint has not formed a good topside fillet

IPC acceptable: A total maximum of 25% depression, including both the primary solder destination and the secondary solder source sides, is permitted.

Primary process set-up areas to check

- Conveyor Speed too slow
 - Time over preheat too long, causing the flux to be burned off
 - Dwell time too long, causing flux to be destroyed before exiting the wave
- Conveyor Speed too fast
 - Dwell time too short / topside board temp too low
- Topside board temp too high for flux, causing it to burn off before the wave
- Not enough flux or the flux is not active enough
- Solder temp too low, it cools in the barrel before it reaches the top side

- Wave height too low in one or both waves, so the solder does not contact the board properly

Other things to look for in the Process

- Solder temp too high
- Pre-heat too high
- Excess flux blow-off
- Solder temp too low
- Pre-heat too low
- Insufficient flux blow-off
- Board not seated properly
- Contaminated flux
- Board pallet too hot
- Solder wave height low
- Flux SP GR too low
- Conveyor speed high
- Solder wave uneven
- Flux SP GR too high
- Flux applied unevenly
- Solder contaminated
- Flux not making contact

Other things to look for with the Assembly

- Board oxidized
- Mask in hole
- Board warped
- Board contaminated
- Moisture in the laminate
- Poor plating in the hole
- Hole and pad
- Mis-registration
- Component contamination mis-registered of the mask

Things to look for with the Board Design

- Poor pallet design
- Internal ground plane
- Pad size mismatched
- Large ground plane on • Lead-to-hole ratio • Large ground plane

Insufficient Solder Bottom Side Fillet

Definition: Where the joint has not formed a good bottom side fillet

IPC acceptable: 100% solder fillet and circumferential wetting present on secondary (solder source) side of the solder joint. Minimal acceptable is to have 330° circumferential fillet and wetting present for class 3 boards, 270° for class 1 and 2 boards.

Primary process set-up areas to check

- Conveyor Speed too slow

- Time over preheat too long causing the flux to be burned off
- Dwell time too long causing flux to be destroyed before exiting the wave
- Bottom side board temp too high causing flux to be burned off before the wave
- Not enough flux or flux activity
- Wave height too low on one or both waves

Other things to look for in the Process

- Solder temp too low
- Pre-heat too high
- Excess flux blow-off
- Board not seated properly
- Pre-heat too low
- Insufficient flux blow-off
- Solder wave height low
- Contaminated flux
- Flux not making contact
- Solder wave uneven
- Flux SP GR too low
- Conveyor speed high
- Solder contaminated
- Flux SP GR too high
- Flux applied unevenly

Other things to look for with the Assembly

- Board contamination
- Improper board handling
- Component contamination
- Component leads too short

Other things to look for with the PC FAB

- Board oxidized
- Mask in hole
- Board warped
- Board contaminated
- Poor plating in the hole
- Component contamination
- Mis-registration of
- Hole and pad the mask mis-registered

Other things to look for with the Board Design

- Poor pallet design
- Large ground plane on
- Lead-to-hole ratio
- Weight distribution component side too large
- Large ground plane on solder side
- Internal ground plane
- Pad size mismatched

De-wetting

Definitions:

De-wetting is a condition that results when molten solder coats a surface and then recedes to leave an irregularly shaped mound(s) of solder that is separated by areas that are re-covered with a thin film of solder and with the basis metal not exposed.

Non-wetting is a condition where there is partial adherence of molten solder to a

surface that it has contacted, and the basis metal remains exposed

Primary process set-up areas to check

• Usually board-related due to contamination on the surface of the pad

Other things to look for in the Process

- Solder temp too low • Pre-heat too high • Excess flux blow-off
- Solder wave height low • Pre-heat too low • Insufficient flux blow-off
- Flux not making contact • Contaminated flux • Board pallet too hot
- Flux applied unevenly • Flux SP GR too low • Conveyor speed high or low
- Board not seated properly • Flux SP GR too high • Solder contaminated

Other things to look for with the Assembly

• Board contamination • Improper board handling • Component contamination

Things to look for with the Board Design

• Board oxidized • Board contaminated

Solder Voids or Out-gassing

Definition: Where the solder joint has a small, visible hole that penetrates from the surface of a solder connection between the conductive patterns on internal layers, external layers or both of a board. This is typically due to moisture entrapment that, during the soldering process, out-gassed from the joint.

Primary process set-up areas to check

- Topside or overall board temperature too low entrapping moisture that is out-gassed at the wave
- Entrapped fluid by component in through hole
- Chemical contaminants not removed during PC fab process
- Contamination in the hole
- Topside of the hole covered by component body or flashing

7

Other things to look for in the Process

- Solder temp too high • Pre-heat too low • Insufficient flux blow-off
- Solder temp too low • Contaminated flux • Board pallet too hot
- Flux applied unevenly • Flux SP GR too low • Conveyor speed high
- Solder wave height low • Flux SP GR too high • Conveyor speed low
- Solder wave uneven • Flux not making contact • Board not seated properly

Other things to look for with the Assembly

- Board contamination • Component contamination • Improper board handling

Things to look for with the PC FAB

- Board oxidized • Defective mask material • Board warped
- Board contaminated • Moisture in the laminate • Poor plating in the hole
- Mask in hole • Hole and pad • Mis-registration of the mis-registered mask

Things to look for with the Board Design

- Lead-to-hole ratio • Internal ground plane • Component orientation too large
- Lead-to-hole ratio too small

Anexo 2. Características soldadura libre de plomo

Aleación de Soldadura Libre de Plomo

Característica:

- Proceso de Soldadura Libre de Punteo - No contiene Plata o Bismuto - Aleación Eutéctica
- Proceso de Soldadura Libre de Residuos - Filetes Tersos, Brillantes y Definidos
- Reduce Proceso de Oxidación en perforaciones, tablillas y tramos.
- Generación de Escoria igual o menor a procesos de Estaño-Plomo
- Cumple con los requerimientos del estándar IPC J-STD-006

Descripción:

La SN100C® es una aleación de soldadura libre de plomo desarrollada por Nihon Superior en Japón. La SN100C® ofrece al usuario propiedades que hacen amigable su uso y que han quedado demostradas en líneas de producción comercial desde 1999. La adición de níquel mejora las propiedades de wetting y de flujo, de la eutéctica de estaño-cobre de costo efectivo. Ésto hace posible lograr excelentes resultados en soldadura por ola, a temperaturas de proceso comparables con aquellas utilizadas con la soldadura de estaño-plomo que esta aleación reemplaza. Su desempeño en soldadura por ola es equiparable a aquella de las aleaciones más caras con contenido de plata, y las uniones resultantes son más suaves y brillantes. La SN100C® está disponible en barra, alambre sólido y con alma y soldadura en pasta.

Comparación de la Superficie de Soldadura:



Composición de la Aleación:

Sn: Balance	Cu: 0.5-0.7	Ni: 0.04-0.07	Ge: 0.008-0.01
-------------	-------------	---------------	----------------

Niveles Típicos de Impureza:

Ag: 0.05	Al: 0.002	As: 0.03	Au: 0.05
Bi: 0.03	Cd: 0.002	Fe: 0.02	In: 0.10
Pb: 0.05	Sb: 0.05	Zn: 0.002	

Soldadura por Ola:

Las principales diferencias entre la soldadura por ola con la soldadura estaño-plomo Sn63/Pb37 y la soldadura por ola con la SN100C® son:

- La “ventana de proceso”, ya que la diferencia entre la temperatura de proceso y el punto de fusión de la soldadura es menor.
- A las temperaturas de proceso recomendadas, el wetting de la SN100C® es más lento. Mayor temperatura de soldadura puede acelerar humectante. De funcionamiento más alta la temperatura no afectará a la aleación SN100C; sin embargo, el daño térmico, el aumento de la disolución de cobre y la generación de escoria son posibles y deben ser considerados.
- Los operadores necesitan asegurarse de que la máquina de soldadura por ola está diseñada para mantener las temperaturas de la soldadura y de la talilla dentro de estos rangos durante el proceso. Utilice los parámetros de inicio recomendados a continuación:

Pre calentamiento	Soldadura por Ola	Tiempo de Espera
110°-115°C (230°-239°F)	260°-300°C (500°-572°F)	3 -7 segundos típicamente

Manejo y Almacenaje:

- Si esta aleación se usa en alambre con alma soluble en agua, el producto tendrá una vida útil de 3 años. Los demás productos como alambre con alma, alambre sólido y soldadura en barra tienen una vida útil indefinida.
- Consulte la MSDS para procedimientos específicos de manejo.

Seguridad:

- Utilícese en un área debidamente ventilada y con equipo protector adecuado.
- Para información específica de emergencia, refiérase a la Hoja de Datos de Seguridad de Material anexa.
- No desechar material peligroso en contenedores no autorizados.

Propiedad del Material		SN100C®	Método de Prueba
Temperatura de Fusión [°C]		Sólido 227	Rampa de calentamiento para diferentes análisis térmicos 20°/min
Líquido 227			
S.G. (Peso Específico)		7.4	Aparato Medidor de S.G. 25°
Calor Específico [J/Kg·K]		220	Valor Estimado
Conductividad Térmica [J/m·s·K]		64	Valor Estimado
Dureza Vickers	Enfriamiento Lento	16.1	Molde en Placa de Aluminio
Enfriamiento Rápido		12.9	Molde en adriillo Aislante
Resistencia a la Tensión [M·Pa]		32	10mm/min. (25°)
Elongación [%]		48	10mm/min. (25°)
Resistencia Eléctrica [$\mu\Omega$ m]		0.13	Para Método Terminal (25°)
Coeficiente de Expansión Térmica	30-80°C	1.33x10-3	Condiciones: Carga: 10.0 grams, sample: Almina (20mm), Temperatura Programada:10°/min.
80-130°C		1.38x10-3	
130-180°C		1.46x10-3	
Factor de Propagación %	240°C	77	JIS Z 3197
250°C		77	
260°C		78	
280°C		78	
Tasa de oxidación 260°C	~ 2 minutos		Tiempo de erosión completa de alambre de 0.18mm Φ
Shock Térmico		>1,000 ciclos	-40/+80° cada 1hr
Electromigración		>1,000 hrs	40° 95%RH & 85° 85%RH
Whiskers		>1,000 hrs	50°

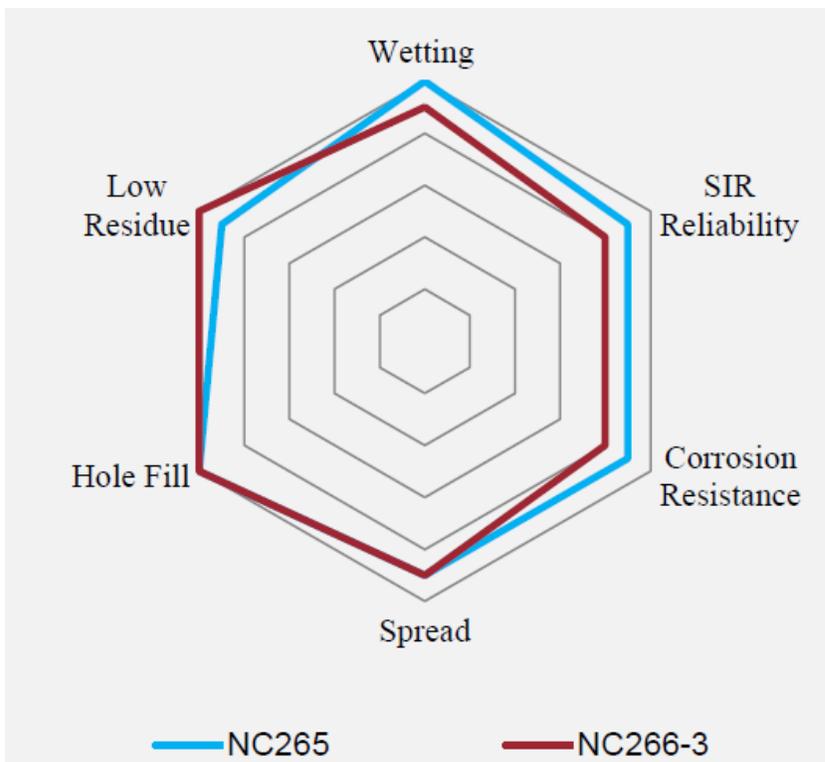
Anexo 3. Características del Flux

NC265 LIQUID FLUX FEATURES

Broad Process Window
Fast Wetting for Lead-Free Alloys
Halide-Free
Low Post Process Residues
REACH Compliant

DESCRIPTION

NC265 is an alcohol-based no-clean liquid flux formulated to offer a very wide process window for lead-free and tin-lead wave soldering operations. NC265 promotes faster wetting than previously formulated fluxes for all lead-free alloys including SN100C®. NC265 is compatible with a broad range of lead-free and tin-lead solder alloys. NC265 leaves low post-process residues and reduces preventative maintenance and cleaning on pallets fixtures and spray equipment. NC265 is designed to be a no-clean flux which can be cleaned if critical to the product application.



NC265 has a sealed shelf life of one (1) year when stored at room temperature. Do not store near fire or flame. Keep away from sunlight as it may degrade product. NC265 is shipped ready-to-use, no mixing necessary. Do not mix used and unused chemical in the same container. Reseal any opened containers. Storage conditions range from 4°- 40° C (40 - 100°F).

APPLICATION

NC265 is formulated for application via spray, foam, brush, mist, or dip. NC265 is ready to use directly from its container, no thinning required. When spray fluxing, proper flux coverage and uniformity are imperative. A dry flux coating of 500-1500 micrograms per square inch is recommended as a starting point. When nitrogen sealed wave solder equipment is used, it is generally necessary to apply additional flux.

PROCESS GUIDELINES

Using thermocouples attached to the top of the PCB, the topside assembly temperature should be between 85-110°C (185-230°F). It is important that the flux be dry prior to entering the wave regardless of temperature or spattering will occur. Smoking may occur and is considered normal if it is not excessive. Recommended contact time with the wave is dependent on wave configuration, pot temperature, alloy type and thermal mass of the assembly with 4-7 seconds being typical.

CLEANING

NC265 can be cleaned using a saponifier or chemical cleaners. Deionized water is recommended for the final rinse. Contact AIM for additional information.

SAFETY

Use with adequate ventilation and proper personal protective equipment. Refer to the accompanying Material Safety Data Sheet for any specific emergency information. Do not dispose of any hazardous materials in non-approved containers

Anexo 4

REGISTRO DE PUESTA A PUNTO DE MÁQUINA DE SOLDEO																							
L1	Wk	Liberó Técnico										Fecha											
4. Parámetros de Perfil de Temperatura (Revisar todos los días)	Datos de perfil:		Lunes			Martes			Miércoles			Jueves			Viernes			Sábado			Domingo		
	Temperatura max (Arriba del PCB)	Ver perfil	°C																				
	Ganancia de temperatura (Slapo)	Ver perfil	°C/Seg																				
	Velocidad del conveyor	Ver perfil	m/min																				
	Delta T (Diferencial)	Ver perfil	°C																				
	Temperatura de contacto	Ver perfil	°C																				
	Tiempo de contacto	Ver perfil	seg																				
	Long. De contacto	Ver perfil	cm																				
	Profundidad de inmersión	Ver perfil	cm																				
	Paralelismo	Ver perfil																					
Fecha en la que se realizó el perfil:																							
Limpieza de pot de soldadura		Lunes			Martes			Miércoles			Jueves			Viernes			Sábado			Domingo			
		1er. Turno	2o. Turno	3er. Turno	1er. Turno	2o. Turno	3er. Turno	1er. Turno	2o. Turno	3er. Turno	1er. Turno	2o. Turno	3er. Turno	1er. Turno	2o. Turno	3er. Turno	1er. Turno	2o. Turno	3er. Turno	1er. Turno	2o. Turno	3er. Turno	

Anexo 5. Prueba de vida tarjeta electrónica

Report No.	0221
------------	------

Validation Test Report

Attention: Nataly Guerrero

Customer:	6228			Validation Result:
Appliance:	B1			Pass
Tests performed at:	PV Laboratory -			
Project:	Reference (Test Method):	Test Execution:	Prepared by (name and function):	Revised by (name and function):
D6228	Thermal cycle reliability audit	<u>Receipt of samples:</u> 2017-08-17 <u>Test Start:</u> 2017-08-23 <u>Test End:</u> 2017-09-02	Luis Rodriguez Validation & Compliance Engineer	Javier Sánchez Head of product validation

Software version:	Not required for testing	Hardware version:	C
-------------------	--------------------------	-------------------	---

Test(s):	Thermal cycle reliability audit																			
Tested Samples ID:	ID # 1171 / 1172 / 1173 /																			
Overview:	Purpose of the test is to accelerate the life of the solder joints.																			
Special instructions:	No special instructions for the test																			
Equipment used:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Instrument</th> <th>Manufacturer</th> <th>Model</th> <th>Ref No</th> <th>Cal Status</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Thermal Chamber</td> <td>ESPEC</td> <td>ESX4CW</td> <td>SN 17105</td> <td>Calibrated</td> </tr> <tr> <td>Temperature data logger</td> <td>Pico Technology</td> <td>USB TC-08</td> <td>MG002341</td> <td>Calibrated</td> </tr> </tbody> </table>					Instrument	Manufacturer	Model	Ref No	Cal Status	Thermal Chamber	ESPEC	ESX4CW	SN 17105	Calibrated	Temperature data logger	Pico Technology	USB TC-08	MG002341	Calibrated
Instrument	Manufacturer	Model	Ref No	Cal Status																
Thermal Chamber	ESPEC	ESX4CW	SN 17105	Calibrated																
Temperature data logger	Pico Technology	USB TC-08	MG002341	Calibrated																

Procedure:

The Chamber profile should be programmed as following:

Low Temperature -40(+0, -10) degrees C

High Temperature +115(+15, -0) degrees C

The time at temperature or *soak mode* will be 10 minutes and transition from low temperature to hot temperature and viceversa will be 50 minutes.

Test Sequence:

1. Place the samples in the fixture inside the chamber.
2. Allow the chamber to cycle for 125 thermal cycles.
3. Upon completion of 125 thermal cycles remove the UUT.

Report No.	0221
------------	------

Validation Test Report

Results:

All samples were inspected visually after completion of thermal cycling looking for cracked solder joints or any other visible quality problem. No problem was found during this inspection.

No stains or imperfections were visible in the product's display neither.

Report No.	0221
------------	------

Validation Test Report

Conclusions and/or recommendations:

Samples are considered to comply with the requirements of the test procedure since they do not present neither solder corrosion, cracked solder joints or stains / imperfections in the display.

----- End of Test Report -----