



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Matamoros

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MATAMOROS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TESIS:

**“APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS SEIS SIGMA EN LA SOLUCIÓN DE
PROBLEMA DE SOLDABILIDAD”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN ADMINISTRACIÓN INDUSTRIAL

PRESENTA:

RODOLFO IVAN GONZALEZ MORALES

DIRECTOR:

Dr. Apolinar Zapata Reboloso

H. Matamoros, Tamaulipas, México

octubre del 2020

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tecnología es progreso®





SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TESIS:

**“APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS SEIS SIGMA EN LA
SOLUCIÓN DE PROBLEMA DE SOLDABILIDAD”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN ADMINISTRACIÓN INDUSTRIAL**

PRESENTA:

DIRECTOR:

Dr. Apolinar Zapata Reboloso

SECRETARIO:

Dr. Jorge Alberto Orrante Sakanassi

VOCAL:

Dr. Sergio Jesus Gutiérrez Zozaya

H. Matamoros, Tamaulipas, México

octubre del 2020

EXCELENCIA EN EDUCACIÓN TECNOLÓGICA®
TECNOLOGÍA ES PROGRESO®

Instituto Tecnológico
de Matamoros





H. Matamoros, Tamps a, **05/OCTUBRE/2020**

**CLAUDIO ALEJANDRO ALCALÁ SALINAS
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE PÓSGRADO
E INVESTIGACION**

Por este conducto, le comunicamos que una vez efectuada la revisión individual del trabajo de tesis del (de la) **C. RODOLFO IVÁN GONZÁLEZ MORALES**, cuyo titulo, es **"APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS SEIS SIGMA EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE SOLDABILIDAD"** y habiendo realizado las observaciones pertinentes nos reunimos en la sala de juntas de la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI), para emitir **DICTAMEN**, el cual es **APROBADO**. Por lo cual nos permitimos autorizarla para que proceda a la impresión del mismo y pueda continuar con los trámites correspondientes, para la obtención del grado de Maestro.

ATENTAMENTE

**APOLINAR ZAPATA REBOLLOSO
DIRECTOR DE TESIS**

**JORGE ALBERTO ORRANTE SAKANASSI
MIEMBRO DEL COMITÉ REVISOR**

**SERGIO JESÚS GUTIÉRREZ ZOZAYA
MIEMBRO DEL COMITÉ REVISOR**

c.c.p. Interesado.
c.c.p Servicios escolares
c.c.p. Comité Revisor
c.c.p. Div. Est. De Posgrado/ Coordinación





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Matamoros
División de Estudios de Posgrado e Investigación

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO(A) EN ADMINISTRACIÓN INDUSTRIAL

El, (La) que suscribe y firma la presente carta de originalidad, **RODOLFO IVAN GONZALEZ MORALES**, autor (a) de la Tesis:

"HERRAMIENTAS SEIS SIGMA APLICADAS A SOLUCION DE PROBLEMA DE SOLDABILIDAD"

Que para obtener el Título de **Maestro en Administración Industrial**, declaro que la tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual, del mismo modo, asumo frente al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Matamoros cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la falta de originalidad de su contenido.

ATENTAMENTE

RODOLFO IVAN GONZALEZ MORALES

H. Matamoros Tamaulipas a 9 de octubre de 2020



Carrretera Izúcar Villar Km 6.5 C.P 87490, A. P. 339 Heroica Matamoros Tamaulipas México.
Tels. 8688140952, 8688140953, 8688140667 ext. 398 y 399 depi_matamoros@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.matamoros.tecnm.mx



Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar al TNM, Tecnológico Nacional de México, por la posibilidad que me ha brindado de mejorar profesionalmente al realizar esta tesis a lo largo del curso de Maestría en Administración Industrial.

En cuanto al personal académico, quiero agradecer a mi director de tesis, el Dr. Apolinar Zapata, por su tiempo dedicado para sugerencias y correcciones, así como sus ideas para llevar en mejor camino esta tesis.

Fuera de la escuela, de igual manera agradezco a mis compañeros de trabajo que participaron indirectamente en este proyecto, personal de ingeniería y de laboratorio. Así como a la empresa Victoreen de México por facilitar la incorporación de información en este trabajo.

Gracias a todos por estos años.

Ivan González

Resumen

El presente trabajo, tiene un enfoque en la mejora del proceso de elaboración de resistencias SMD, en la planta maquiladora Ohmite/Victoreen de México, la cual se encuentra localizada en la ciudad de H. Matamoros.

Ohmite/Victoreen se dedica a la elaboración de resistencias electrónicas de diferentes tipos (axiales, cerámicas, montaje superficial) desde hace más de 30 años en la localidad.

Esta tesis, se enfoca en proponer mejoras al proceso de elaboración de resistencias de montaje superficial para aplicaciones en equipo médico. Esta resistencia es de gran importancia en la elaboración de dispositivos médicos utilizados para estabilizar pacientes con problemas cardiacos. El dispositivo tiene como función principal la reanimación del paciente ante indicios de inestabilidad cardiaca.

Las propuestas de mejoras podrán ser visualizadas solo después de recopilar datos del proceso, los cuales tendrán que ser debidamente analizados e interpretados.

De igual manera, se requiere un marco teórico que sea la base de la metodología a aplicar en el desarrollo de la investigación. En el marco teórico se describirán las herramientas a utilizar en este estudio, así como expondrá sus orígenes, aplicaciones, resultados, impacto, etc.

Se utilizará el programa de estadística Minitab para procesar la información recolectada y realizar los cálculos estadísticos, para de esta manera tomar las decisiones con respecto a las hipótesis o suposiciones planteadas respecto a los problemas a solucionar, siendo el principal, relacionado con el problema de soldabilidad, el cual tiene un fuerte impacto en la adhesión de los componentes en la aplicación final del cliente

Abstracto

La presente investigación presenta el problema de soldabilidad en un componente electrónico (resistencia) manufacturada por medio del proceso de impresión de películas gruesas (Thick film en inglés).

Se introduce el termino de soldabilidad como una deficiencia en la adhesión de soldadura en las áreas de conductor del componente electrónico y como esto puede verse reflejado en problemas de sujeción en la aplicación de cliente final. Dicha deficiencia es detectada como parte de una prueba de laboratorio durante la manufactura del producto.

La investigación presenta el estándar con el cual es evaluado el método de clasificación de soldabilidad, por medio del cual se puede establecer el grado de aceptación o rechazo de esta prueba.

La propiedad de soldabilidad fu evaluada de acuerdo con el estándar JEDEC J-STD-002 - "Pruebas de soldabilidad para conductores de componentes, terminaciones, terminales y cables", utilizando elementos (resistencias) con diferentes espesores de impresión en la capa conductora.

Los resultados demostraron que, los elementos con la mejor clasificación de soldabilidad (95-100% del área) fueron aquellos en los cuales la capa de conductor fue impresa en un rango de 30-45 micras con una sola capa, la cual resultaba en una capa de conductor en quemado o curada de 10 a 15 micras. Mientras que, por otra parte, los elementos (resistencias) con el menor grado de soldabilidad fueron aquellos impresos con dos capas de conductor lo cual originaba una capa de impresión del conductor de 80 micras en húmedo y en quemado una vez horneada de 25 a 30 micras.

Índice

Contenido

Agradecimientos	iii
Resumen.....	iv
Abstracto.....	v
Índice	vi
Contenido.....	vi
Introducción	ix
CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL PROBLEMA	2
1.1. Descripción de la problemática	2
1.2. Planteamiento del Problema	7
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo general	8
1.3.2. Objetivos secundarios.....	9
1.4. Justificación.....	14
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1. Marco Conceptual	16
2.1.1. Definiendo Seis Sigma y antecedentes.....	16
2.1.2. Resistencias eléctricas.....	20
2.1.3. Clasificación de resistencias	21
2.1.4. Tecnología de montaje superficial	26
2.2. Tecnología de circuitos impresos, definición y descripción	28
2.2.1. Esquemas y estrategias de elaboración	28
2.2.2. Aplicaciones de la tecnología de películas gruesas	31
2.2.3 Materiales y equipo usado en la impresión de películas gruesas	33
2.3. Pruebas de desempeño y confiabilidad	51

2.3.1. Prueba de soldabilidad.....	52
2.4. Marco de Referencia.....	57
2.4.1. Proceso de manufactura de resistencia Physio 68156	57
2.4.2 Descripción del proceso de elaboración para resistencia 68156	59
2.4.3 Situación actual para prueba de soldabilidad.....	69
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	73
3.1. Población y Muestra.....	73
3.2. Tipo de estudio.....	74
3.3. Metodología DOE.....	75
3.3.1 Definir.....	77
3.3.2 Medir	81
3.3.3 Pre- Analizar.....	88
3.3.4 Experimentar.....	93
3.3.5 Analizar	95
3.3.6 Mejorar	97
3.3.7 Controlar	99
3.4 Realización de experimento.....	101
3.4.1 Recolección de datos y situación antes de experimentación	102
3.4.2 Definir.....	105
3.4.3 Medir	110
3.4.4 Pre-Analizar	113
3.4.5 Experimentar.....	115
3.4.6 Analizar	118
3.4.7 Mejorar.....	123
3.4.8 Controlar	125
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	131
4.1. Resultados objetivo general.....	131

4.2. Resultado Objetivo específicos	132
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	135
5.1 Conclusiones.....	135
5.2 Recomendaciones	137
Referencias	138

Índice de figuras

Figura 1 - Capas de resistencia..	3
Figura 2 - Substrato con conductor..	4
Figura 3 - Substrato con resistencia.....	4
Figura 4 - Resistencia final individual.....	5
Figura 5 - Representación de soldabilidad.....	6
Figura 6 - Simbología de resistencia eléctrica.....	21
Figura 7 - Tipos de resistencia.....	23
Figura 8 - Capas de resistencia.....	24
Figura 9 - Componentes de montaje superficial.....	25
Figura 10 - Áreas de soldadura.....	25
Figura 11 - Resistencias de montaje superficial.....	26
Figura 12 - Resistencias SMT en tablillas.....	27
Figura 13 - Componentes SMD.....	29
Figura 14 - Diagrama proceso de impresión.....	30
Figura 15 - Capas impresas.....	30
Figura 16 - Aplicación de pasta.....	31
Figura 17 - Aplicaciones de componentes.....	32
Figura 18 - Circuito de películas gruesas.....	33
Figura 19 - Diseños de cerámicas.....	34
Figura 20 - Vehículo de una tinta.....	36
Figura 21 - Aglutinantes de tintas.....	37
Figura 22 - Componentes funcionales (polvos).....	38
Figura 23 - Estructura de un conductor horneado.....	38
Figura 24 - Pantallas de impresión.....	40
Figura 25 - Acercamiento a pantalla.....	41
Figura 26 - Componentes de una pantalla.....	41
Figura 27 - Figuras en pantallas.....	42
Figura 28 - Gomas de impresión.....	43
Figura 29 - Maquina de impresión.....	44
Figura 30 - Pantalla, plato y substrato.....	45
Figura 31 - Representación de impresión.....	45
Figura 32 - Hornos de curado.....	46
Figura 33 - Rampa de secado.....	47
Figura 34 - Etapas de curado en horno.....	48
Figura 35 - Componentes de un horno.....	49
Figura 36 - Flujo de proceso de impresión.....	50
Figura 37 - Efectos de mala soldabilidad.....	56
Figura 38 - Capas de impresión 68156.....	57
Figura 39 - Modelo 3d de 68156.....	58
Figura 40 - Diagrama de bloques basico.....	Error! Bookmark not defined.

Figura 41 - Diagrama de flujo.....	60
Figura 42 - Pantallas de impresión para 68156.....	61
Figura 43 - Proceso depositado de tinta.....	62
Figura 44 - Capa conductora frontal y trasera.....	62
Figura 45 – Segunda capa conductora trasera..	63
Figura 46 - Diseño capa de resistencia.....	64
Figura 47 - Tinta resistiva.....	65
Figura 48 - Substrato con dieléctrico.....	66
Figura 49 - cerámica con estampado.....	67
Figura 50 - Elementos separados individualmente.....	68
Figura 51 - Elemento después de prueba de soldabilidad.....	70
Figura 52 - Metodología diseño de experimentos.....	76
Figura 53 - árbol de decisiones.).....	85
Figura 54 - Efecto de los factores.....	86
Figura 55 - Interacción entre dos factores.....	87
Figura 56 - Diagrama de Pareto de efectos.....	96
Figura 57 - Ejemplo mala soldabilidad.).....	104
Figura 58 - Equipo de trabajo.....	105
Figura 59 - Elementos rechazados.....	106
Figura 60 - Clasificación defectos soldabilidad.....	109
Figura 61 - Identificación de factores.....	110
Figura 62 - Clasificación diseños de experimentos.....	114
Figura 63 - Pareto respuesta soldabilidad.).....	119
Figura 64 - Grafica de residuos.....	120
Figura 65 - Grafica interacciones soldabilidad.....	121
Figura 66 - Grafica efectos principales.).....	122
Figura 67 - Hoja de proceso impresión.....	125
Figura 68 - Plan de control.....	126
Figura 69 - Estudio de capacidad.....	128
Figura 70 - Defectos después de experimento.....	129

Índice de tablas

Tabla 1- Objetivos generales y específicos	10
Tabla 2 - Variables e indicadores	11
Tabla 3 Principales materiales para sustratos	35
Tabla 4 - Dureza para gomas de impresión.....	43
Tabla 5 - Orden para experimento.....	73
Tabla 6 - Actividades de experimento.....	77
Tabla 7 - Fase Definir.....	78
Tabla 8 - Fase Medir	82
Tabla 9 - Fase Pre-analizar	89
Tabla 10 - Fase Experimentar	94
Tabla 11 - Fase Analizar.....	95
Tabla 12 - Fase Mejorar	98
Tabla 13 - Fase Controlar	100
Tabla 14 - Relación defectos antes experimento.....	103
Tabla 15 - Factores y rangos.....	113
Tabla 16 - Matriz para experimento soldabilidad	117

ABREVIATURAS Y TERMINOS

Thick Film Process – Proceso de Película Gruesa

PCB – Tablilla de Circuito Impreso (Printed Circuit Board en inglés).

SMT – Surface Mount Technology (Tecnología de Montaje Superficial).

SPC – Control Estadístico del Proceso.

Ohm / Ohmio– Unidad de medida de la resistencia eléctrica derivada del Sistema Internacional de Unidades.

Serigrafía – Técnica de impresión consiste en transferir una tinta a través de una malla tensada en un marco.

Substrato – Placa de superficie plana que puede ser de diferentes materiales (metal o cerámica) y sobre el cual se deposita una capa de tinta/pasta para crear una impresión.

Goma para impresión (Squegge) – Elemento utilizado para depositar tinta sobre un substrato a través de una malla tensada.

Curado / Quemado – Proceso de horneado a alta temperatura por medio del cual se adhieren los componentes funcionales de una tinta en un substrato.

Dieléctrico – Material con baja conductividad eléctrica y generalmente aislante.

Cuarto limpio – Sala o área especialmente diseñada para obtener niveles bajos de contaminación, generalmente empleada para la elaboración de productos electrónicos.

Soldabilidad – Capacidad de un metal para ser cubierto por soldadura fundida.

DOE – Diseño de experimentos (Acronimo de “design of experiments” en inglés)

IPC – Instituto de Circuitos Impresos. Conjunto de normas para la estandarización el ensamble y los requerimientos de producción de equipo y ensamblajes electrónicos.

DMAIC – Herramienta iterativa utilizada para la mejora de procesos. Utilizada generalmente en proyectos se Seis Sigma.

Resistencia o Resistor – Componente electrónico diseñado para introducir una resistencia eléctrica determinada entre dos puntos de un circuito eléctrico.

SMD – Dispositivo de Montaje Superficial (Surface Mount Device en inglés).

Flux – Químico utilizado en los procesos de soldadura para facilitar la unión del estaño; generalmente se utiliza en forma líquida.

ANEXOS

Anexo 1. Dibujo de Ingeniería para 68156-4K7JE	139
Anexo 2. Diseño para impresión de Capas de resistencia 68156-4K7JE	142
Anexo 3. Diagrama de flujo del proceso de resistencia 68156-4K7JE	147
Anexo 4. Criterios de evaluación área de soldabilidad (Prueba B1)	148
Anexo 5. Ejemplos de resultados para soldabilidad en base a diseño de experimentos	149
Anexo 6. Modificación bajo nuevo número de parte 68195-4K7JE	150
Anexo 7. Parámetros de impresión para resistencia 68195-4K7JE.....	153

Introducción

El presente trabajo busca mostrar la utilidad de las herramientas de Seis sigma, en específico las relacionadas con el diseño de experimentos (DOE o design of Experiments in ingles), dentro del entorno industrial, así como las ventajas atribuidas a dichas herramientas de estadística.

A pesar de las ventajas que otorga la teoría sobre estas herramientas, su aplicación en este entorno en ocasiones no es de uso común a pesar de que la bibliografía existente está muy relacionada a esta área. Este trabajo pretende mostrar la utilización de estas herramientas aplicado a un problema real relacionado con la manufactura de un producto electrónico (resistencia).

En el capítulo I se introduce al lector con una descripción detallada del problema, así como las variables objeto de estudio y el alcance pretendido de la investigación. El capítulo II presenta un marco teórico a través del cual se busca explicar el proceso utilizado para la elaboración del producto objeto de estudio. En el capítulo III se describe la metodología del diseño de experimentos y se pone en práctica por medio del caso de estudio.

Finalmente, el capítulo 4 y 5 presenta los resultados de la investigación, así como las conclusiones y recomendaciones generadas como resultado de este trabajo.

CAPÍTULO I.
GENERALIDADES
DEL PROBLEMA

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la problemática

Este proyecto se llevó a cabo en la empresa Ohmite/Victoreen de México, localizada en la ciudad de H. Matamoros Tamaulipas, y se dedica a la manufactura/elaboración de diferentes tipos de resistencias eléctricas, las cuales tienen a su vez diferentes aplicaciones, como puede ser para el ramo automotriz, aeroespacial y la industria médica, siendo esta última la considerada para el presente trabajo.

La resistencia objeto del problema en este proyecto, se categoriza en la industria electrónica como del tipo cerámica y se fabrica utilizando un sustrato de alúmina (cerámica) sobre la cual se depositan metales conductores y resistivos en forma de tinta (con cierta viscosidad) por medio de un proceso similar al de serigrafía.

Primero se depositan sobre la cerámica los elementos conductivos que servirán para permitir un área resistiva y la unión con la soldadura en donde se ensamble el componente final. Este proceso se hace en el lado superior e inferior de la cerámica, así como en los bordes de esta.

Después se aplica la tinta resistiva, la cual, en base a su composición, tendrá un valor resistivo predeterminado y puede ser mezclado con tintas de otros valores resistivos para alcanzar el valor resistivo requerido.

Finalmente se aplica una capa de tinta protectora, normalmente un dieléctrico, la cual tiene como función proteger el área resistiva de cualquier daño debido al medio ambiente o cualquier otro agente externo. Las diferentes capas que conforman este elemento electrónico se muestran en la Figura 1.

Todas estas capas, llevan un proceso de horneado intermedio entre cada una de ellas, con el cual se realiza el tratamiento adecuado de cada capa.

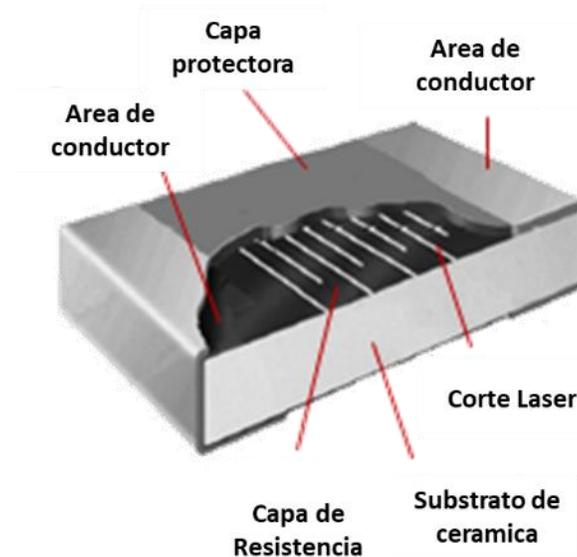


Figura 1 - Capas de resistencia. La imagen muestra las diferentes capas impresas que componen una resistencia electrónica, elaborada mediante un proceso de película gruesa (Thick film). Heraeus, 2019.

El proceso de película gruesa se realiza principalmente en un área conocida como cuarto limpio, en donde se busca que todos los elementos utilizados en la fabricación de las resistencias se encuentren protegidos de agentes como humedad, contaminación, etc.

A grandes rasgos, podemos identificar dos procesos clave en la elaboración de resistencias:

- 1- Proceso de impresión o pintado. Es la etapa en el cual las tintas son depositadas en el sustrato (en este caso una cerámica). Dichas cerámicas pueden contener una cantidad limitada de elementos, los cuales pueden ser separados al finalizar el procesamiento. Se muestra un ejemplo de impresión en las figuras 2 y 3.

- 2- Proceso de horneado. Es la etapa del proceso en la cual las tintas aplicadas en el sustrato son sometidas a altas temperaturas (desde 150 hasta 850 °C), este proceso es conocido como “curado”, para de esta manera obtener sus propiedades funcionales.

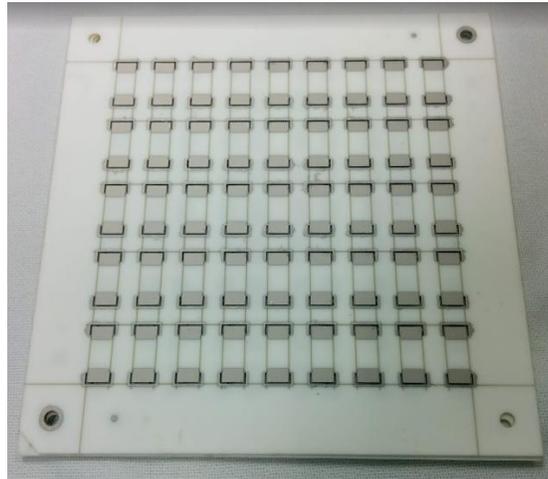


Figura 2 - Substrato con conductor. La imagen presenta un ejemplo de un sustrato con una capa de tinta conductora (áreas en color gris) aplicada mediante un proceso de impresión. El sustrato contiene 90 elementos que posteriormente pueden ser separados individualmente. Autoría propia, 2019.

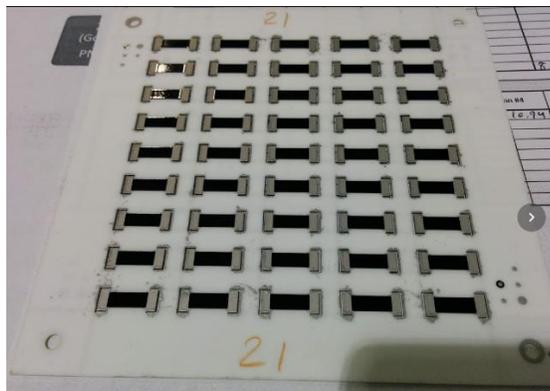


Figura 3 - Substrato con resistencia. La imagen muestra un ejemplo de sustrato con una capa tinta resistiva (Áreas en color negro) aplicada mediante un proceso de impresión. Autoría propia, 2019

Una vez que las diferentes capas de tintas se han depositado o impreso en el sustrato, se obtiene el componente final. Se muestra un ejemplo de un componente final con todas las capas del elemento en la figura 4. Dicho componente se muestra una vez separado de un sustrato de 90 elementos.

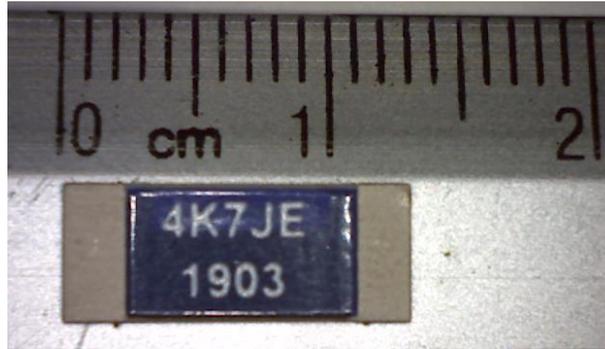


Figura 4 - Resistencia final individual. La imagen ilustra un ejemplo de una resistencia elaborada por proceso de impresión una vez separada de un sustrato de 90 elementos. Dimensione real. Autoría propia, 2019.

Para poder plantear el problema objeto de estudio en este proyecto, es necesario definir un concepto conocido como soldabilidad.

La soldabilidad es aquella propiedad de los componentes electrónicos, mediante la cual se establece si un elemento electrónico puede poseer una correcta y suficiente propiedad de adhesión de la soldadura al componente manufacturado. Dicha propiedad está ligada a la capa conductora, la cual es usada como interfaz entre la soldadura y el área en la cual será ensamblado el componente.

Una buena soldabilidad nos asegura componentes que pueden ser ensamblados perfectamente en las tablillas electrónicas, mientras que una baja o mala soldabilidad, conlleva un riesgo en el cual los componentes podrían presentar desde intermitencia en su funcionamiento, hasta desprendimiento del mismo elemento en el circuito en el cual fueron ensamblados.

En la figura 5 se muestran condiciones representativas de la propiedad de soldabilidad, en la cual se observa la adhesión de la soldadura en una muestra de elementos impresos con tinta conductora, donde posteriormente se aplica soldadura líquida.

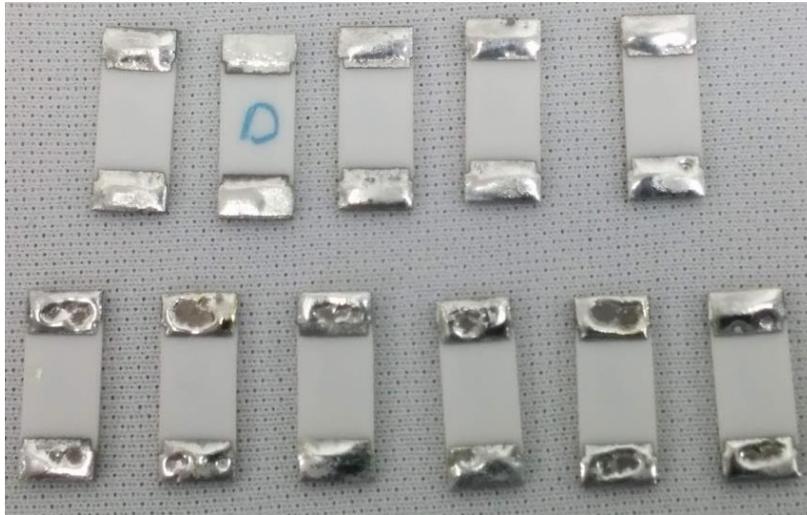


Figura 5 - Representación de soldabilidad. En la parte superior se observan piezas con correcta soldabilidad, la cuales muestran una superficie de soldadura uniforme. En la parte inferior se muestran piezas con mala soldabilidad, la cuales muestran una superficie cubierta con soldadura irregular. Autoría propia, 2019.

Durante el desarrollo de este producto, es decir durante los primeros prototipos y pruebas piloto, se observó un problema en las terminaciones o contactos de los elementos elaborados. Este problema podía ser identificado desde las pruebas de validación, en la cuales se observó que las resistencias no tenían un recubrimiento uniforme de soldadura al ser sometidas a la prueba de soldabilidad.

El producto (resistencia, Fig. 4) objeto de esta investigación, presenta problemas de baja/mala soldabilidad, donde dicho criterio se establece mediante estándares de aceptación de partes basados en los manuales de IPC y J-STD-002D. Este problema de soldabilidad puede presentarse debido a diferentes factores, los cuales pueden ir desde contaminación, impresión incorrecta de partes y hasta generarse debido a un horneado incorrecto de las partes.

1.2. Planteamiento del Problema

Dada la situación presentada anteriormente, podemos definir que el defecto a eliminar es el relacionado con el problema de soldabilidad ya que es un defecto que origina desde retrabajo para recuperación de los elementos que presenten esta condición hasta un desperdicio, ya que en ocasiones no se puede recuperar el producto.

Una vez que el material se identifica con la condición de pobre soldabilidad, el material no puede ser recuperado en la mayoría de los casos y al imprimirse en lotes de varios componentes a la vez, el desperdicio es considerable.

Además, aun cuando el defecto puede ser identificado durante la primera etapa del proceso, es decir durante la impresión y curado de las capas de conductor, el material ya no puede ser utilizado en las etapas posteriores.

Para objeto de esta investigación, se proponen las siguientes cuestiones:

¿En qué manera, un proceso controlado puede contribuir a manufacturar partes aceptables? ¿Qué controles específicos, pueden asegurar un proceso para una soldabilidad aceptable?

¿Se pueden atribuir los problemas de soldabilidad a la utilización de cerámicas en condiciones no deseadas, como contaminación?

¿Las condiciones de los hornos utilizados durante el proceso de horneado de los elementos, pueden representar un contribuyente para que se presente un problema de soldabilidad?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de la investigación propuesta es identificar los contribuyentes en la solución del problema de soldabilidad durante la manufactura de resistencias electrónicas para uso en tablillas de montaje superficial (SMT).

El proceso de identificar los contribuyentes no es una tarea fácil, para ello se va a requerir aplicar una de las herramientas de Seis sigma, en este caso en particular se busca que utilizando la metodología de diseño de experimentos sea posible encontrar una solución al problema de soldabilidad. Estas herramientas deben asegurar un proceso estable que elimine el problema de soldabilidad en por lo menos un 90%.

Después de identificados los contribuyentes será necesario identificar aquellos que estén más relacionados con el problema de soldabilidad.

Posteriormente, estas herramientas serán implementadas en por lo menos dos órdenes de manufactura de resistores, cuyos contribuyentes serán controlados y debidamente identificados durante todo el proceso. Esto ayudaría a verificar que los contribuyentes pueden ser controlados, y en consecuencia eliminar el problema de soldabilidad.

1.3.2. Objetivos secundarios

Para poder cumplir con el objetivo general previamente definido y que dará pauta para la posible solución del problema de este proyecto, será necesario definir objetivos secundarios.

Los objetivos secundarios son aquellos que nos permitirán cumplir con el objetivo general paulatinamente de manera estratégica y nos permiten un acercamiento a la solución del problema a través de datos medibles y concretos en determinada etapa de la investigación.

Para la presente investigación los objetivos secundarios están enfocados primeramente en identificar las variables del proceso, las cuales nos permitirán identificar aquellos parámetros que pudieran tener relación con el problema de soldabilidad a resolver.

Después se recopilará y analizarán los datos históricos para determinar la frecuencia o el número porcentual con el cual se presenta el problema descrito.

Una vez identificadas las variables del proceso y los datos históricos, se analizará el flujo del proceso para observar y obtener datos de este.

Por último, en base a la información recopilada, se aplicarán herramientas de Seis Sigma para buscar obtener la reducción o eliminación del problema presentado, y a la vez, estudiar los posibles contribuyentes del problema para establecer controles del proceso.

Los objetivos anteriormente mencionados, se muestran de manera general en la tabla 1.

Tabla 1- Objetivos generales y específicos

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS METODOLÓGICOS
<p>Utilizando herramientas de Seis Sigma, identificar y controlar los contribuyentes al problema de soldabilidad.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar variables del proceso 2. Analizando los datos históricos calcular la frecuencia con la cual el problema de soldabilidad ocurre. 3. Analizar el flujo del proceso para identificar posibles fallas. 4. Aplicación de herramientas de Seis Sigma para identificar los contribuyentes al problema de soldabilidad. 5. Estudiar los contribuyentes para aprender a controlarlos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1.1. Recabar información sobre herramientas, modelos o métodos aplicables en la manufactura del producto. 2.1. Identificar el historial del defecto de soldabilidad. 3.1 Identificar las características medibles del producto que pueden contribuir al defecto. 4.1 Implementar las herramientas de Seis sigmas en base a las características medibles del producto. 5.1 Procesar la información obtenida en base al uso de las herramientas de Seis Sigma y evaluar impacto en el problema de soldabilidad.

Nota: Impacto de la aplicación de herramientas de Seis Sigma en la solución de problema de soldabilidad.

1.3.3. Hipótesis

La presente investigación, plantea las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula: Después de determinar los valores adecuados de las variables de proceso, el problema de soldabilidad seguirá presente.
- Hipótesis alternativa: Una vez establecidos los valores adecuados de las variables del proceso, el problema de soldabilidad se reducirá en por lo menos 90%.

A continuación, se presenta la tabla 2 listando el nombre de las variables con su correspondiente descripción. Estas serán las variables por controlar una vez determinar sus valores adecuados.

Tabla 2 - Variables e indicadores

Variables	Descripción
Tinta	Tipo de tinta usada en la impresión de capa conductora: Plata/Palladium, Plata
Grosor	<p>Espesor de impresión medida en micras (um)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Límites de control (Estandarización) <ul style="list-style-type: none"> - Características de impresión • Control estadístico del proceso Control de límites por SPC.
Horno	Tipo de horno utilizado en el proceso: Horno 1 y Horno 2. Los hornos tienen una longitud de 15 metros. Las piezas son introducidas a los hornos a través de una banda transportadora cuya velocidad puede ser fijada. Dentro del horno se encuentran de 10 a 13 zonas cuya temperatura en

	cada una de ellas puede ser variada desde 25°C hasta 1000 °C.
Receta	Secuencia de temperaturas fijadas en las zonas del horno.
Velocidad	Velocidad, de 4 a 5 pulgadas por minuto, de la banda transportadora que introduce las piezas al horno.
Curado	Resistencia al desprendimiento de la tinta curada El curado está directamente relacionado con el grosor de la tinta cuando la pieza sale del horno, el cual debe estar en un rango de 10 a 15 um (micras).
Soldabilidad	Número de piezas en la muestra, seleccionadas de un lote de producción que presentan condición de soldabilidad no aceptable.

Nota: Variables e indicadores de investigación.

Variables	Indicadores
Herramientas Seis Sigma (Diseño de Experimentos)	<ul style="list-style-type: none"> • Variación del proceso (Cpk). <ul style="list-style-type: none"> - Grosos de impresión (Húmedo, Quemado) • Límites de control (Estandarización) <ul style="list-style-type: none"> - Características de impresión • Control estadístico del proceso <ul style="list-style-type: none"> - Control de límites por SPC.
Soldabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Aceptabilidad • Reducción de problema de soldabilidad

Nota: Variables e indicadores de investigación.

1.4. Justificación

La justificación de la investigación propuesta tiene como propósito adquirir una nueva oportunidad de negocio, al resolver el problema de soldabilidad en el proceso de manufactura. Al obtener la aprobación del cliente para este producto, se estarán generando ventas anuales esperadas con un valor aproximado de \$500, 000 USD en la etapa madura del proyecto (2-3 años)

Para obtener esta oportunidad de negocio, es necesario eliminar o reducir el problema de soldabilidad en por lo menos un 90%, para que de esta manera sea considerado un producto redituable en utilidad para la empresa.

El producto (resistencia) objeto de estudio, implica también un reto tecnológico, ya que el proceso de manufactura utilizado consiste en una técnica de impresión no utilizada anteriormente en la empresa, lo cual nos daría controles necesarios para migrar este proceso de manufactura y por lo tanto el producto a otros clientes que así lo requieran.

Por último, este proyecto cuenta con un elemento de aportación a la sociedad, ya que es utilizado en la elaboración de chalecos desfibriladores, los cuales servirán para reducir la tasa de mortandad en pacientes con cirugías de corazón próximas.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTOS
TEÓRICOS

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Marco Conceptual

2.1.1. Definiendo Seis Sigma y antecedentes

El concepto de “Seis sigmas”, se refiere a una metodología de mejora de procesos, centrada en la reducción de la variación de estos, por medio de la optimización de cada parte del proceso para así conseguir la reducción o la eliminación, en algunos casos, de los defectos o fallos en la elaboración de un producto o servicio.

De acuerdo con Gómez (2003), técnicamente también se puede definir a seis sigmas como una medida de variación que representa 3.4 defectos por cada millón de partes u oportunidades de defectos.

Seis sigmas se definen como una propuesta de disciplina basada en datos que propone una mejora continua de la calidad de los procesos, los cuales se traducen en un aumento en la productividad que refleja mayores beneficios al oferente del producto o servicio. Esto puede lograrse mediante de la reducción de la cantidad de variaciones en el proceso, encaminándose a obtener salidas finales que sean consistentes y predecibles.

Los siguientes conceptos resumen a grandes rasgos, las principales características de esta metodología (Vazquez, Seis-Sigma, Metodología y Tecnicas, 2008):

- Seis Sigma es una disciplina que utiliza métodos estandarizados de varias etapas, en conjunto con herramientas específicas para analizar procesos. Estos métodos se encuentran englobados dentro de la metodología mejor conocida

como DMAIC (Por las siglas en inglés Define, Measure, Analyze, Improve and Control), o en español Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar.

- Basada en Datos – Se busca utilizar datos basados en mediciones estadísticas, los cuales son analizados para posteriormente tomar decisiones que permitan mejorar las salidas de un proceso o servicio. Esto evita la toma de decisiones basadas en opiniones.
- Proceso – Es una metodología cíclica donde se miden series de subprocesos o tareas para convertir las entradas en salidas posteriormente.
- Mejora continua – El ciclo es repetitivo, las mejoras nunca terminan.
- Calidad – Capacidad de un proceso de cumplir con los requerimientos del cliente.
- Productividad – Un proceso se considera productivo cuando tiene la capacidad de transformar las entradas en salidas de manera efectiva y eficiente.
- Beneficios claros – Seis Sigma es una propuesta originada por altos puestos de empresas como Motorola y General Electric (GE), quienes eran evaluados en base a resultados financieros, en contraste con estrategias de calidad utilizadas previamente en donde los objetivos y resultados no eran muy claros frecuentemente.

De igual manera, esta metodología tiene como principal objetivo al cliente, representada por medio de lo que se conoce como “La voz del cliente”, la cual es una técnica de Seis Sigma utilizada para definir características o atributos críticos de calidad de un producto o servicio.

Cuando un proceso cuenta con la habilidad de reconocer los atributos críticos de calidad del cliente, se tiene una gran oportunidad para que el producto o servicio otorgue una salida eficiente y efectiva. Es en este caso cuando se reconoce un proceso con una capacidad aceptable que cumple con los requerimientos del cliente. Determinar si la capacidad de un proceso es óptima, implica entender primero los requerimientos del cliente y segundo, saber interpretar el desempeño del proceso mismo.

Por otra parte, la reducción de la variación del proceso es la única manera de aumentar la capacidad de este, y por lo tanto la única para acercarnos a un nivel de Seis Sigma. Una de las primeras herramientas utilizadas para controlar la variación del proceso es la conocida como “Carta de Control”, la cual fue creada por Walter Shewhart en los años 20, durante su trabajo en los laboratorios Bell.

La base para la reducción de la variación del proceso conlleva el reducir los defectos del proceso. Esto es posible mediante el diseño de procesos robustos y una implementación de controles constante por medio de distintas herramientas como cartas de control, graficas de Pareto, procesamiento a prueba de errores, etc.

La metodología Seis Sigma (Six Sigma en inglés), fue desarrollada en Motorola en los años 80 por el Ingeniero Bill Smith, sin embargo, esta técnica no es completamente nueva, ya que en gran parte fue concebida durante los últimos 50 años, a partir del trabajo de expertos en calidad como Deming, Juran, entre otros.

En 1981 Bob Gavin director de Motorola, estableció el objetivo de mejorar 10 veces el desempeño en un periodo de 5 años, en 1985 Bill Smith en Motorola concluyó que, si un producto se reparaba durante la producción, otros defectos quedarían escondidos y saldrían con el uso del cliente, adicionalmente si un producto se ensamblaba libre de errores, no fallaba en el campo, en 1988 Motorola ganó el premio Malcolm Baldrige, y las empresas se interesaron en analizarla.

Mikel Harry desarrolla la estrategia de cambio hacia Seis Sigma, sale de Motorola e inicia el “Instituto de Investigación Seis Sigma” con la participación de IBM, TI, ASEA y Kodak.

En 1991 se implanta en la empresa Allied Signal, lo cual contribuye en numerosas iniciativas como lo fue Texas Instruments, posteriormente su implementación continua en General Electric por Jack Welch lo cual genero resultados impactantes difundiendo a nivel internacional el potencial de su enfoque ya que ahí la metodología mejoro, numerosas empresas han introducido esta técnica dentro de sus organizaciones algunas de ellas son: Bombardier, Siebe, Sony, Polaroid Corporation, Toshiba, entre otras.

A mediados de los años 90 empresas como American Express, Allied Signal, Polaroid, Sony, Lockheed, NASA, Black & Decker, Bombardier, Dupont, Toshiba, Mabe, Johnson Controls, Kenworth, etc. ya estaban involucradas en la metodología Seis Sigma.

Hoy en día Seis Sigma ha evolucionado constantemente desde su aplicación como herramienta de calidad dentro de las empresas y como parte de su filosofía, su aplicación ya no solo es en el sector industrial sino también en el sector de servicios.

2.1.2. Resistencias eléctricas

En electrónica se le conoce a la resistencia como un elemento pasivo el cual impide el paso de los electrones cuando llega a ella por una pista o unión eléctrica.

Según Castillo (2017), podemos nombrar también como ejemplo a la resistencia eléctrica de una determinada sustancia, que se define como la oposición que halla la corriente eléctrica a la hora de entrar en circulación. Su valor se representa con la unidad de ohmios (Símbolo Ω). Por otra parte, se conoce como resistencia o resistor a la pieza electrónica que ha sido fabricada para generar una resistencia eléctrica concreta entre dos puntos de un mismo circuito.

La resistencia eléctrica es la oposición (dificultad) al paso de la corriente eléctrica. Como sabemos, la corriente eléctrica es el paso (movimiento) de electrones por un circuito o, a través de un elemento de un circuito (receptor). Según lo dicho podemos concluir que "la corriente eléctrica es un movimiento de electrones".

Todos los objetos, sea cual sea su material, ofrecen una menor o una mayor resistencia para el paso de la corriente eléctrica. Entre los metales los que presentan una menor resistencia son la plata y el oro; la razón por la cual los conductores que se utilizan dentro de los cables son de cobre es porque sería sumamente costoso fabricarlos de oro o plata y además, el cobre también es un muy buen conductor y claramente, mucho más económico.

El símbolo con el que se representa a la resistencia en un circuito eléctrico o dibujo es el mostrado en la figura 6 (siendo el primero el más común mientras que el segundo es usado en programas de simulación):

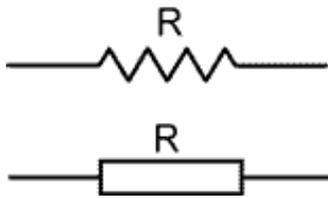


Figura 6 - Simbología de resistencia eléctrica. El símbolo superior es usado comúnmente en diferentes bibliografías, el símbolo inferior es más utilizado en programas para diseño electrónico por computadora.

2.1.3. Clasificación de resistencias

No todas las resistencias son iguales, hablando de tamaño, algunas tienen un volumen más grande o pequeño, lo cual no significa precisamente que una resistencia de mayor tamaño físico tenga una mayor resistencia eléctrica que otra de menor tamaño. De manera general, el tamaño está más relacionado con los materiales usados para su elaboración.

Existen tres tipos básicos de resistencias que podemos mencionar a manera de poder identificar posteriormente el tipo de resistencia objetivo del trabajo a desarrollar (Castillo, 2017):

- Resistencias aglomeradas
- Resistencias de capa o película
- Resistencias embobinadas

Las resistencias aglomeradas se componen de una masa homogénea de grafito mezclado con un elemento aglutinante, fuertemente prensado en forma cilíndrica y encapsulada en un manguito de material aislante como el plástico. El valor óhmico de una resistencia de carbón, es decir, su mayor o menor facilidad para dejar pasar la corriente eléctrica depende de las proporciones del grafito y aglutinante empleadas en su fabricación.

En las resistencias de capa o película el elemento resistivo es una finísima capa de carbón sobre un cuerpo aislante, de forma también cilíndrica. El cuerpo central es, en algunos casos, un minúsculo tubo de cristal con los terminales de conexión conectados a cada extremo. Una variante de este tipo de resistencias es la llamada resistencia de película metálica, en la que la capa de carbón ha sido sustituida por una aleación metálica de alta constante resistiva (níquel, cromo u oro-platino) o un óxido metálico como el óxido de estaño.

En las resistencias bobinadas se emplea un hilo conductor que posea una resistencia específica especialmente alta. El hilo conductor se arrolla encima de un cuerpo, generalmente un tubo de cerámica. En cuanto a los extremos del hilo, se fijan generalmente con abrazaderas que a su vez pueden servir como conexiones para el montaje e, incluso, si las abrazaderas son desplazables se pueden obtener valores de resistencia parciales. En muchas ocasiones se hallan también colocadas dentro de un prisma cerámico de sección cuadrada y se sellan con una silicona especial para que se hallen debidamente protegidas.

A la hora de su fabricación podemos usar muchos materiales. A continuación, en la figura 7 se muestran los tipos de resistencias de acuerdo con los materiales diferentes utilizados en su elaboración:

TIPOS DE RESISTORES

Película de carbón

- 5%, 10%
- Barato
- Propósito general



Óxido metálico

- Mayor potencia



Película metálica

- Precisión 1%
- Alto desempeño



Alambre

- Alta potencia,
Alta corriente



SMD para circuitos impresos

Alta Potencia



Figura 7 - Tipos de resistencia. La figura muestra resistencias de tipo embobinado (Carbón, Óxido Metálico y Película metálica), Metálicas y Cerámicas

Dentro del tipo de Resistencias de capa o película, tenemos las resistencias del tipo SMD (Surface Mount Device por sus siglas en ingles). Este tipo de resistencias corresponden al tipo más utilizado en la actualidad, principalmente en la elaboración de componentes electrónicos (Celulares, pantallas, equipo médico, etc.)

Se usa tanto para componentes activos como pasivos, y se basa en el montaje de estos componentes sobre la superficie del circuito impreso. Tanto los equipos así contruidos como los componentes de montaje superficial pueden ser llamados dispositivos de montaje en superficie/superficial o SMD (Surface mount device por su siglas en ingles) (Miguel, 2009).

Construcción Básica de un Resistor SMD

Los resistores SMD son de forma rectangular. Tienen áreas metalizadas en los extremos del cuerpo lo que les permite ponerse en contacto con la placa de circuito impreso a través de la soldadura. En la figura 8 se muestran las partes que componen una resistencia del tipo SMD.

El resistor consiste en un sustrato de cerámica y en éste se deposita una película (capa) de óxido de metal. El grosor y la longitud de la película real determina la resistencia. En vista del hecho de que las resistencias SMD se fabrican utilizando óxido de metal, son bastante estables y por lo general tienen una buena tolerancia.

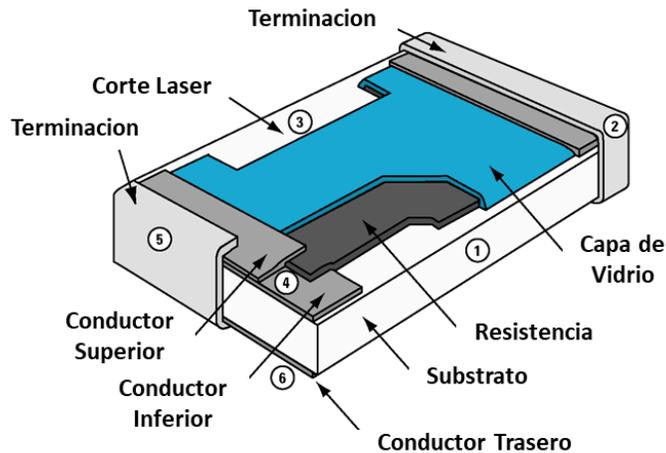


Figura 8 - Capas de resistencia. La imagen muestra las diferentes capas y partes que componen una resistencia eléctrica del tipo SMD. Heraeus, 2019

Los componentes SMD son montados en tablillas electrónicas donde las conexiones se realizan mediante contactos planos, una matriz de esferas en la parte inferior del encapsulado, o terminaciones metálicas en los bordes del componente.

La figura 9 muestra diferentes tipos de componentes SMD, los cuales van de izquierda a derecha, desde resistencias, capacitores y circuitos integrados.

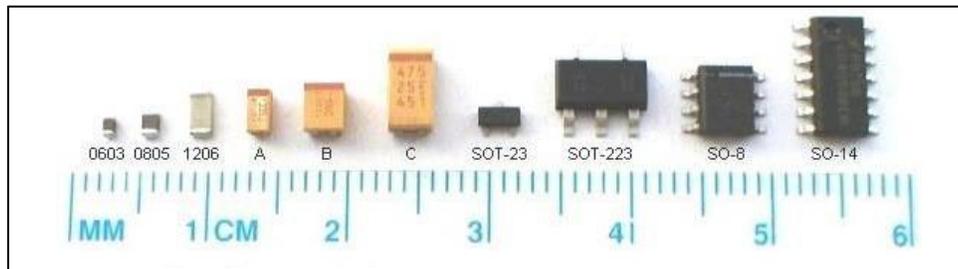


Figura 9 - Componentes de montaje superficial. La figura muestra los tamaños de los componentes de montaje superficial utilizados más comúnmente en la industria electrónica.

Los componentes SMD, están diseñados para ser colocados o ensamblados en tablillas electrónicas por medio de la utilización de soldadura. Dichos componentes tienen asignadas áreas de unión en las tablillas, estas áreas de unión son definidas con anticipación durante la etapa de diseño de la tablilla electrónica.

La figura 10 muestra el ejemplo de un área para soldar un componente SMD en una tablilla electrónica, por medio de sus respectivas áreas de soldadura. El área punteada determina el tamaño del elemento a ser soldado en la tablilla electrónica, mientras que las áreas con líneas solidas muestran el lugar en donde sebera ser colocado el componente SMD.

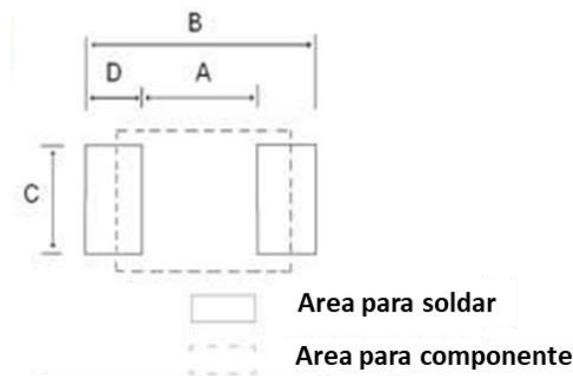


Figura 10 - Áreas de soldadura. La figura muestra la definición de las áreas del componente y el área de soldadura de este en un circuito electrónico común.

Este tipo de tecnología es usado en aplicaciones de producción masiva (por encima de los miles de unidades), de bajo consumo de energía (como dispositivos portátiles), de baja temperatura y/o de múltiples aplicaciones en tamaño reducido (como equipo de cómputo, medición e instrumentación). Sin embargo, debido a su reducido tamaño, el ensamblado manual de las piezas se dificulta, por lo que se necesita mayor automatización en las líneas de producción. En la figura 11 se observa un ejemplo de componentes de montaje superficial montados sobre una tablilla de circuito eléctrico impreso (PCB, Printed Circuit Board por sus siglas en ingles).

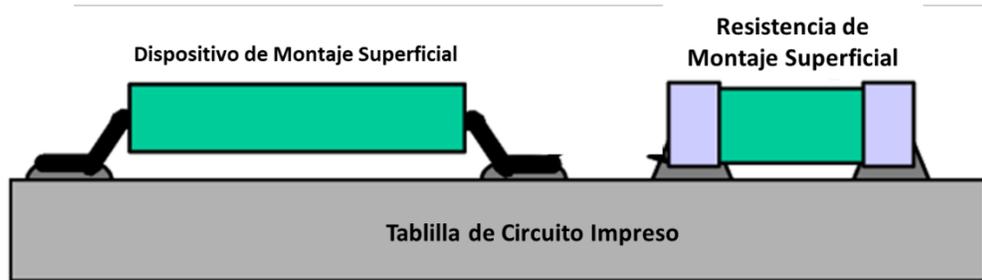


Figura 11 - Resistencias de montaje superficial. La figura muestra Resistencias de montaje superficial en una tablilla de circuito impreso.

2.1.4. Tecnología de montaje superficial

La tecnología de montaje superficial (SMT - inglés - Surface Mount Technology) “es el proceso de construir circuitos electrónicos, en donde los componentes están soldados directamente sobre la superficie de una placa de circuito impreso (PCB)” (Castillo, 2017) . Dentro de la tecnológica, el montaje superficial ha substituido a la técnica de la tecnología de agujero pasante (through hole en inglés); el método utilizado en el proceso de instalar componentes con cables alámbricos en agujeros de la tarjeta del PCB, atravesando la placa de un lado a otro.

La tecnología de Montaje Superficial es diferente, las conexiones se realizan mediante contactos en la superficie inferior de la placa o terminaciones metálicas alrededor de la placa. Las dos tecnologías pueden ser usadas en el mismo circuito impreso para componentes que no están hechos para el SMD tales como los transformadores y semiconductores de alta potencia en disipadores de energía térmica. En la figura 12 se muestran ejemplos de dispositivos de tecnología THT (Tecnología de Agujeros pasantes) y tecnología SMT (Tecnología de Montaje Superficial).

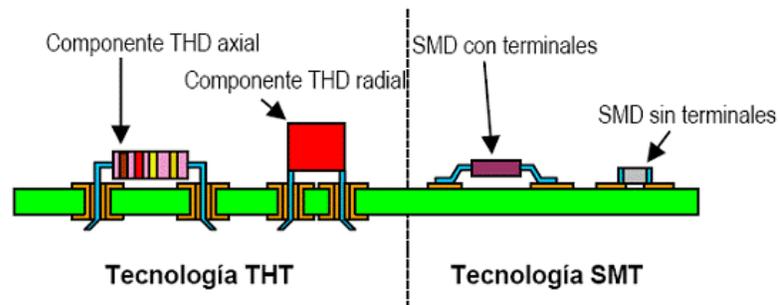


Figura 12 - Resistencias SMT en tablillas. La figura muestra Resistencias SMT en tablillas electrónicas (Through Hole izq. Y SMT Der.)

Un componente de SMT, o un SMD (dispositivo de montaje superficial) es normalmente más pequeño que uno de la tecnología de agujeros pasantes porque tiene cables más pequeños o no los tiene en absoluto.

Puede contener unos pines electrónicos cortos o cables de diferentes formas, contactos planos o alternativamente terminaciones metálicas al borde del circuito. Como es evidente, el ensamblado a mano de piezas utilizando la tecnología SMD es difícil, por eso exige la automatización, por ejemplo, por medio de líneas de fabricación masiva.

En el siguiente capítulo se describe de manera detallada el proceso general para producir resistencias del tipo SMD (Surface Mount Device o Dispositivos de Montaje Superficial) utilizados en el ensamble de circuitos SMT. La resistencia eléctrica objeto de esta investigación, corresponde al tipo SMD por lo cual es necesario definir los principales procesos que intervienen en su elaboración.

2.2. Tecnología de circuitos impresos, definición y descripción

2.2.1. Esquemas y estrategias de elaboración

Para la elaboración de algunos tipos resistencias del tipo SMD (Surface Mount Device en inglés o Dispositivos de Montaje Superficial en español), se utiliza un proceso de fabricación conocido como Impresión de Películas Gruesas (Thick Film printing en inglés), este proceso es también el utilizado para la resistencia presentada en esta investigación.

El proceso de Thick Film o Películas Gruesas consiste en crear circuitos o componentes pasivos donde una pasta (también conocida como tinta) es aplicada por medio de algún método de depositado, donde después esta misma pasta es curada para obtener el producto final, en la figura 13 se muestran algunos ejemplos de componentes SMD creados a partir del proceso de Películas Gruesas.

Algunas pastas/tintas usadas en el proceso de Películas Gruesas son:

- Circuitos Híbridos (Utilizando Conductores, Resistencias y dieléctricos)
- Pastas aislantes para metales
- Resinas
- Polímeros

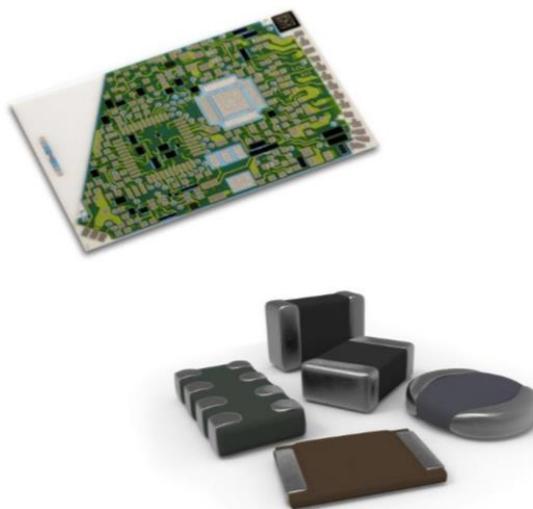


Figura 13 - Componentes SMD. Creados por medio de proceso de Películas Gruesas, en la parte superior se muestra una tablilla con un circuito electrónico, en la parte inferior se muestra un conjunto de resistencias y capacitores elaborados por medio del proceso de Película Gruesa. (Heraeus 2019)

“La tecnología de "Thick Film" o “Impresión de Película Gruesa” en español, utiliza pastas conductivas, resistivas y aislantes (dieléctricos) que contienen trazas de vidrio, depositadas en patrones definidos por medio de pantallas de impresión y fusionadas a alta temperatura sobre un sustrato, regularmente cerámico” (Gilleo, 1996). Las impresiones son realizadas típicamente en el rango de 5 a 20 μm de espesor, donde el rango de resistividad es de 10Ω / por cuadro cuadrado a $10\text{M}\Omega$ / por cuadro. De igual manera, existen posibilidades para construir estructuras multicapa.

El proceso de impresión de Película Gruesa se basa principalmente, como se menciona en capítulos anteriores en depositar la pasta o tinta sobre un sustrato que puede ser de diferentes materiales (principalmente cerámica), el cual es curado a altas temperaturas que van generalmente desde los $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. El proceso posteriormente es repetido las veces que sea requerido, dependiendo de las diferentes capas por las cuales este compuesto el componente o diseño del elemento a fabricar. En la fig. 14 se ilustra un proceso básico de impresión de Película Gruesa.



Figura 14 - Diagrama proceso de impresión. La figura muestra un diagrama básico de un proceso de Impresión utilizado en la elaboración de componentes por medio de la tecnología de Película Gruesa (Heraeus 2019).

La figura 15 muestra esquemáticamente algunos de las capas de un circuito impreso por esta técnica, como conductores, resistencias y capacitores.

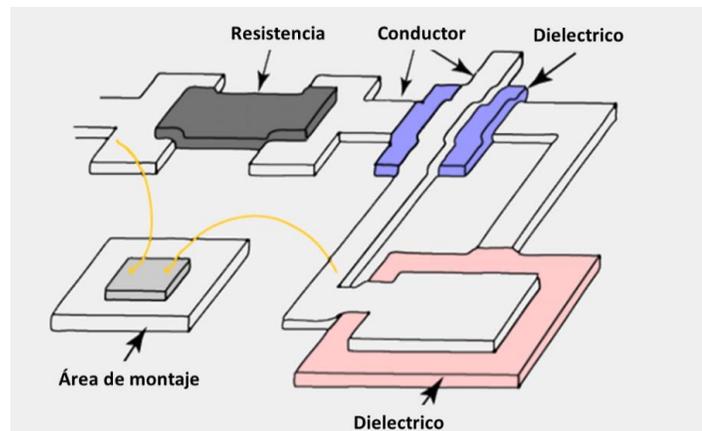


Figura 15 - Capas impresas. La figura muestra una simplificación de las capas impresas por proceso de Película Gruesa en un circuito impreso, así como los diferentes materiales utilizados.

La técnica más común para la aplicación de una pasta/tinta de Película Gruesa es por medio de una pantalla de impresión, las cuales son unas estructuras rectangulares con una malla de tela formada por hilos de acero o nylon en su interior, a través de la cual se hace una impresión sobre el substrato (figura 16)

Existen otros métodos para la aplicación de pastas/tintas, pero en el proceso de la planta Victoreen de México (Ohmite), el método por impresión semiautomático con pantalla es el utilizado.

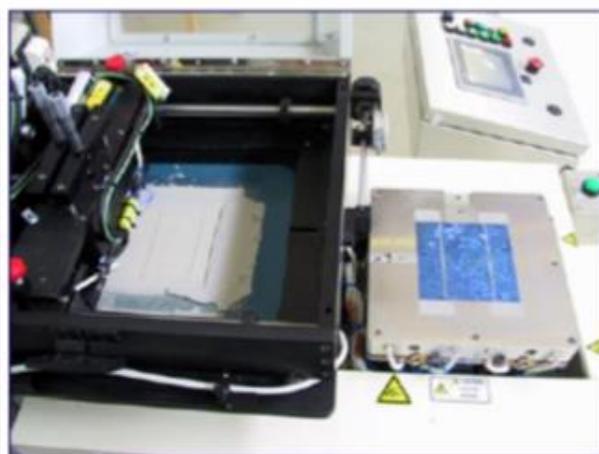


Figura 16 - Aplicación de pasta. La imagen muestra un ejemplo de aplicación de pasta (Tinta) por método semiautomático. Este método es el más utilizado en las industrias con procesos de Película Gruesa, (Heraeus, 2019)

2.2.2. Aplicaciones de la tecnología de películas gruesas

La tecnología de película gruesa se utiliza para producir dispositivos electrónicos como elementos de montaje superficial (SMD por sus siglas en ingles), circuitos integrados híbridos, elementos de calentamiento y sensores.

Los circuitos de película gruesa se usan ampliamente en la industria automotriz, tanto en sensores para mezcla de combustible / aire, sensores de presión, controles de motor y caja de cambios, sensores para liberar bolsas de aire, encendedores en bolsas de aire (Ejemplos mostrados en la Figura 17)



Figura 17 - Aplicaciones de componentes. La imagen superior muestra las distintas aplicaciones que tienen los componentes (por ejemplo, resistencias) elaborados mediante un proceso de Películas Gruesas (Heraeus 2019).

En la figura 18 se observa un ejemplo de una impresión de circuito con múltiples capas en un substrato, de izquierda a derecha tenemos las siguientes capas:

- Conductor de fondo
- Tres capas compuestas de dieléctrico, contactos e interconexiones
- Un dieléctrico usado para definir áreas de contacto
- Un componente montado, con conexiones y resina en la parte superior (negra)

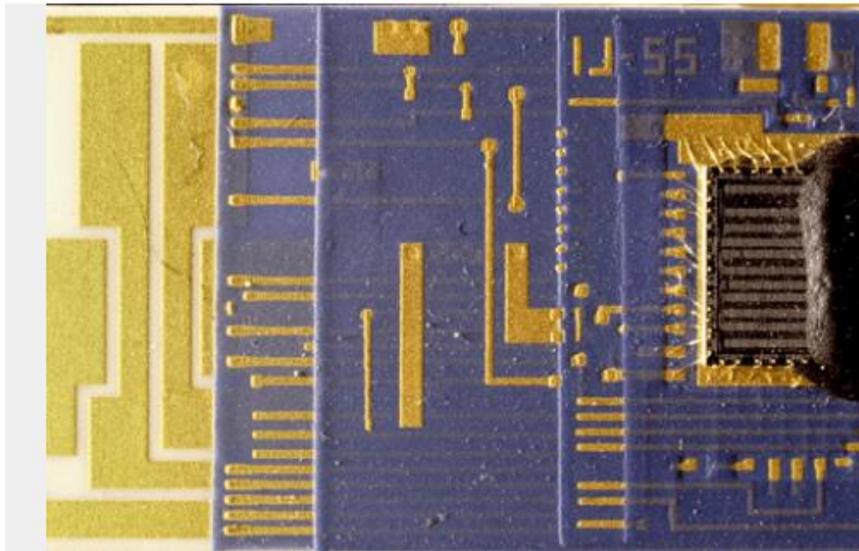


Figura 18 - Circuito de películas gruesas. La imagen anterior muestra un ejemplo de impresión de un circuito con varias capas por medio de un proceso de Películas Gruesas, (Heraeus, 2019)

Cuando se usa cualquier tipo de método de impresión, existen límites en cuanto a las dimensiones del diseño a imprimir, lo cual hace que los diseños o figuras de alta densidad o una impresión muy saturada sean de alta dificultad.

2.2.3 Materiales y equipo usado en la impresión de películas gruesas

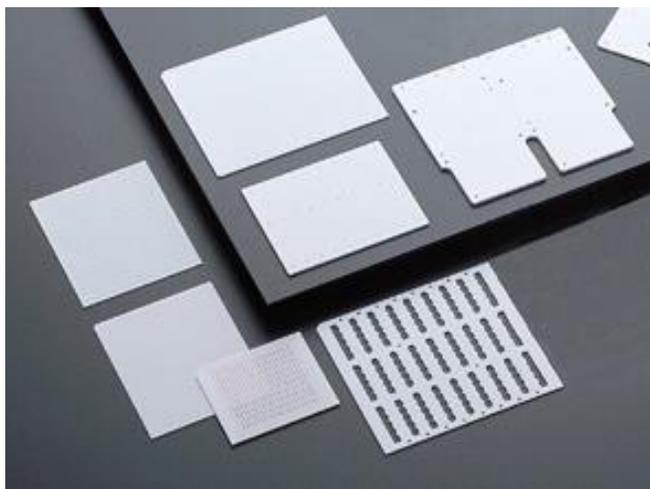
Como se mencionó en el capítulo anterior, en el proceso de impresión de circuitos, se emplean principalmente dos materias primas. Tenemos primero el sustrato, que es el material sobre el cual se depositaran los materiales que formaran la impresión del circuito. Después tenemos las pastas o tintas, las cuales serán depositadas sobre el sustrato para dar forma al circuito impreso y que son las que definirán su funcionamiento eléctrico.

Substratos

Los materiales de sustrato más utilizados en el proceso de impresión de Películas Gruesas son las cerámicas, generalmente de material alúmina, con tamaños

de partículas en el rango de 3 a 5 μm , y 94 a 98 por ciento de contenido de alúmina. Existen también otros tipos de sustratos, los cuales pueden ser de materiales como aluminio, fibra de vidrio, acero, o plásticos.

Las cerámicas (Figura 19) son adecuadas para el procesamiento de impresión de Películas Gruesas (Thick Film). El aislamiento resistivo del vidrio (incluido su comportamiento a altas temperaturas) es la propiedad más importante por la cual las cerámicas son las más utilizadas en el proceso de impresión de circuitos.



*Figura 19 - Diseños de cerámicas. En la imagen anterior se muestran diferentes diseños de Cerámicas de Alúmina utilizadas para imprimir sobre ellas circuitos o componentes a partir de proceso de Películas gruesas.
Fuente: Kyocera, 2019*

Los sustratos de cerámica están disponibles en diferentes grosores y formas, dicho grosor o forma de la cerámica dependerá del componente o circuito a imprimir. De igual manera, dependiendo del tipo de cerámica a utilizar en el proceso, dependerá el tipo de tinta que se depositará o imprimirá sobre ella. No todas las pastas son compatibles con todos los tipos de cerámica y viceversa.

Como dato adicional, la planicidad de los sustratos es importante para lograr una óptima impresión o depósito de las tintas sobre el sustrato, cualquier variación mínima en la planicidad o algún signo de curvatura, podría afectar la calidad de la impresión.

La tabla 3 muestra los principales materiales de sustrato utilizados en los procesos de Película Gruesa, beneficios de cada material, así como las temperaturas soportadas para el curado de las tintas que se depositen sobre el mismo.

Tabla 3 Principales materiales para sustratos

Material	PET	FR4	Aluminio	Acero	Alúmina
Mercado	electrónica Flexible	Potencia Baja-Media	LED	Calentadores	Híbridos
Beneficios	Flexible/ Transparente	Costo	Conductividad	Fuerza mecánica	Duración y costo
Rango de Temperatura	25 – 150°C	100-150 °C	400-600 °C	400-1200 °C	400-500 °C

Nota: Listado de los principales materiales utilizados en sustratos de impresión, así como sus principales propiedades.

Tintas para Impresión de Circuitos

La tecnología de Impresión de Circuitos es tradicionalmente un proceso aditivo, es decir, los diversos componentes o circuitos se producen sobre el sustrato mediante la aplicación de "tintas" (o "pastas") y se agregan secuencialmente una sobre otra para producir los patrones de conductor y los valores de resistencia requeridos.

Dentro de las diferentes formulaciones de tintas/pastas utilizadas en el proceso de película gruesa tenemos:

- Conductores
- Resistencias
- Dieléctricos

Donde cada una de estas pastas/tintas, como anteriormente se ha mencionado, está compuesta por:

- Un elemento portador (Vehículo), normalmente solventes orgánicos y plastificantes
- Un aglutinante (Normalmente vidrio).
- El material mismo para depositar, típicamente metales puros, aleaciones y óxidos de metal.

El vehículo es una composición orgánica que permite que el material sea transferido o depositado sobre el sustrato. Su composición es a base de resinas y solventes, donde la resina tiene como función mantener los sólidos contenidos dentro de la pasta. El vehículo de la pasta debe evaporarse o quemarse completamente durante el proceso de curado, el cual se detalla en capítulos posteriores

Las resinas componen el 3-5% de la pasta/tinta, mientras que los solventes forman un 15-20% aproximadamente de la pasta (figura 20).



Figura 20 - Vehículo de una tinta. La imagen anterior muestra el químico que actúa como vehículo en una pasta/tinta para transportar los componentes funcionales en una pasta/tinta para un proceso de película gruesa, Fuente: Heraeus, 2019

Por otra parte, el aglutinante es un compuesto orgánico usado para unir los componentes funcionales de la pasta al sustrato después del curado de la pasta. Se utilizan principalmente óxidos de cerámica o vidrio.

El vidrio se funde durante el proceso de curado y forma una unión mecánica entre los componentes funcionales de la pasta y el sustrato. Los óxidos de cerámica reaccionan con el sustrato y crean una estructura cristalina entre los componentes funcionales y el sustrato. Generalmente los aglutinantes conforman entre un 5 y 10% de la composición de la pasta (figura 21).



Figura 21 - Aglutinantes de tintas. La imagen muestra el componente aglutinante utilizado en una pasta/tinta que tiene como función adherir las sustancias funcionales al sustrato sobre el cual se pinta. Fuente: Heraeus, 2019

Finalmente tenemos los componentes funcionales de la pasta, los cuales, dependiendo de la función o tipo de pasta, proveen la capacidad conductiva, resistiva o aislante.

Los materiales funcionales están compuestos de polvos de cerámica o metales finamente divididos, como puede ser Plata, Oro, Platino o Paladio para las pastas de tipo conductivas. Dióxido de Rutenio para las pastas resistivas y Oxido de metales y vidrios para las pastas con función aislante.

Los polvos de metal utilizados en este tipo de pastas tienen un diámetro de entre 3 - 5 μm (Micrones), mientras que los polvos de cerámica son usualmente de entre 5 a 10 μm . El componente funcional puede llegar a formar un 70-80% de la composición de la pasta/tinta (figura 22).

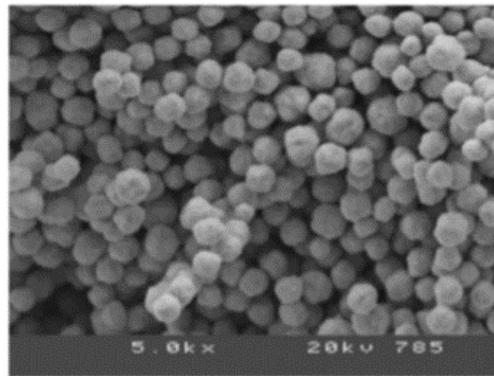


Figura 22 - Componentes funcionales (polvos). La imagen anterior muestra las partículas de metal utilizados en una tinta/pasta. Los metales funcionales pueden ser utilizados en tintas conductivas o resistivas. Fuente: Heraeus, 2019

La estructura resultante después del quemado se muestra esquemáticamente en la figura 23, en ella se representa la estructura formada una vez que la tinta ha sido curada en un horno de alta temperatura:

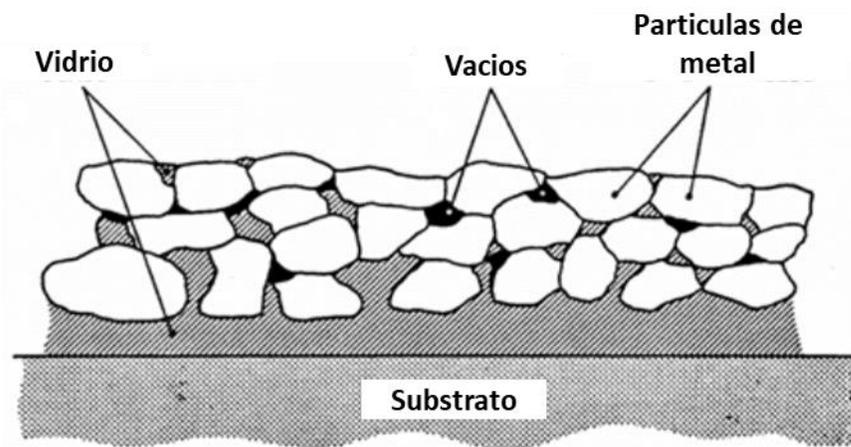


Figura 23 - Estructura de un conductor horneado. En la imagen se observan las partículas de vidrio el cual es el aglutinante de la tinta y también se observan las partículas de metal, estas últimas son los elementos funcionales en una tinta conductiva. Heraeus, 2019

Las partículas metálicas se unen entre sí y al sustrato por la capa vítrea, lo cual es una característica particularmente importante en la interacción de la tinta-sustrato. Las superficies quemadas generalmente no son uniformes ni homogéneas en una microescala.

En comparación con las pastas de soldadura, los tamaños de partícula son mucho más pequeños y las suspensiones son más estables. Las tintas están diseñadas para proporcionar una viscosidad adecuada para el proceso de impresión por serigrafía, y van desde ser simplemente sólidas hasta simplemente líquidas: se debe lograr un equilibrio entre una tinta de baja viscosidad que se extenderá después de la impresión y una pasta espesa, la cual que mostrará demasiadas marcas de malla, al no haber "nivelado" a superficie durante el quemado.

Pantallas de impresión

Las pantallas utilizadas en el proceso de impresión de elementos de película gruesa proveen el método de interacción entre las pastas y el sustrato para que se pueda realizar el depositado de la pasta sobre el sustrato.

Las pantallas están hechas de acero inoxidable altamente tensado o malla de poliéster, con un tejido relativamente abierto para permitir que la pasta de impresión pase a través de él, típicamente con 100 a 300 alambres de 0.003 pulgadas de diámetro por pulgada lineal. Dichas pantallas tienen una "transparencia" (también conocida como "área abierta") de aproximadamente el 40%.

Los fabricantes de pastas de película gruesa normalmente especifican malla de acero inoxidable porque tiene la mejor estabilidad dimensional y un mayor porcentaje de área abierta que el poliéster, lo que permite un paso más fácil de la pasta o tinta a través de la pantalla. Sin embargo, el poliéster es más resistente, menos propenso a daños y se desvía más fácilmente para adaptarse a la superficie sobre la que se va a imprimir. Los recuentos altos de malla permiten resolver detalles más finos, pero dan

impresiones más delgadas. En general, el fabricante de pasta sugerirá un tipo de malla que se adapte a su pasta, y esto siempre formará un muy buen punto de partida: el acero inoxidable de malla 200 y malla 325 es probablemente el más utilizado.

Las pantallas están formadas principalmente por dos elementos, los hilos de acero que son los que forman una especie de malla a través de la cual pasará la pasta a imprimir y una emulsión. La emulsión es una fina película adherida a la pantalla la cual por medio de un proceso de “revelado” toma la forma de la figura o diseño que se requiere imprimir sobre el sustrato.

La figura 24 muestran las pantallas típicas utilizadas en el proceso de impresión de películas gruesas. Como se observa en ellas, el área azul corresponde al área por la cual la tinta no será depositada en el sustrato, mientras que el área transparente o de color claro contienen una figura la cual es parte del diseño que se requiere transferir hacia el sustrato por medio del depositado de tintas.

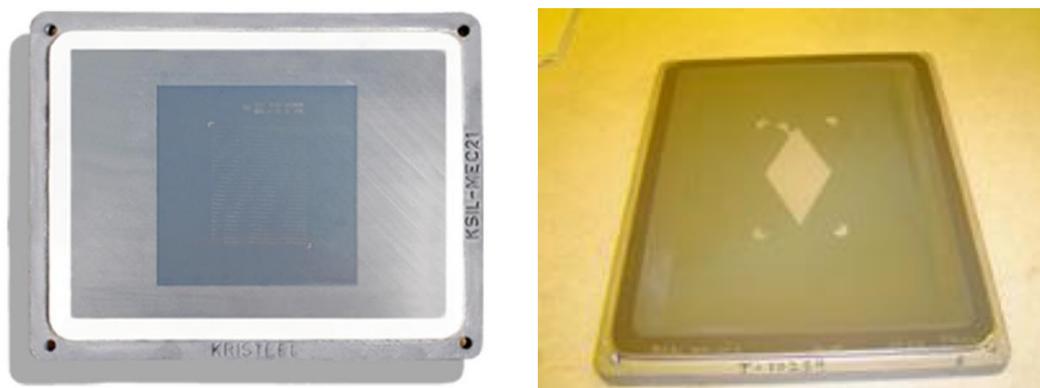


Figura 24 - Pantallas de impresión. Las imágenes muestran ejemplos de pantallas de impresión utilizadas en proceso de impresión de película gruesa. El área azul no permite la transferencia de tintas hacia el sustrato, el área transparente o clara permite que la tinta fluya a través de la pantalla por medio de pequeñas aperturas en forma de rejilla. Fuente: Ohmite, 2019

Los espacios de malla entre los cables se llenan inicialmente con esta emulsión fotosensible, que es modelada o expuesta mediante la exposición a la luz ultravioleta a través de una máscara fotográfica. Las áreas expuestas durante este proceso se vuelven solubles en el revelador, lo que descubre las aberturas a través de las cuales se exprime la tinta durante el proceso de impresión (Figura 25).

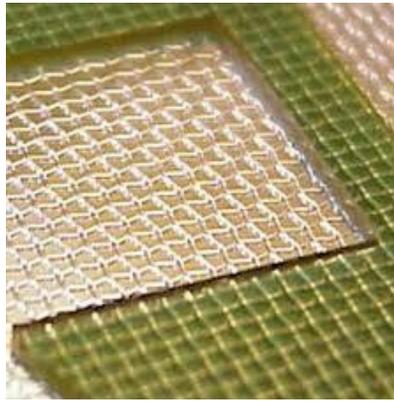


Figura 25 - Acercamiento a pantalla. La imagen muestra un acercamiento de una pantalla con hilos de acero descubiertos, a través de estas aperturas la tinta o pasta será transferida/impresa hacia el sustrato. Fuente: Heraeus, 2019

Si hacemos un acercamiento a una pantalla de impresión, la pantalla se vería como en la Figura 26: la capa de emulsión está al ras con la parte superior de la malla, pero continúa debajo de la parte inferior de la malla. Esto es para asegurar que la plantilla pueda sellarse sobre el sustrato mientras mantiene los filamentos de malla alejados del sustrato en el borde de las aberturas de la plantilla. Esto asegura que las pastas puedan fluir debajo de los cables hasta el borde de las aberturas, produciendo así bordes de impresión limpios. Esta emulsión adicional o separador suele tener un grosor de 10-30 μm (micras).

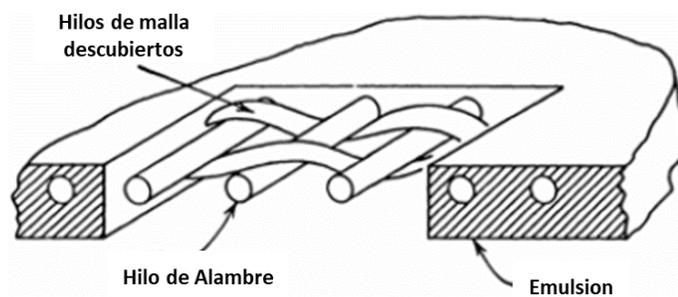


Figura 26 - Componentes de una pantalla. La imagen muestra una representación de los componentes funcionales de una pantalla de impresión. La emulsión tiene como función impedir el paso de la pasta o tinta, mientras que una vez retirada de acuerdo con la figura a transferir al sustrato, se descubren los hilos de acero para permitir el paso de la pasta/tinta hacia el sustrato., Fuente: Heraeus, 2019

Como se ha mencionado, las figuras creadas en una pantalla de impresión dependen del elemento o circuito que se requiere transferir hacia un sustrato y pueden ser de cualquier figura o diseño. La figura 27 muestra ejemplos de una pantalla con los hilos de acero expuestos (sin la emulsión), formando figuras a través de las cuales la tinta o pasta posteriormente será transferida/impresa sobre un sustrato (cerámica, metal, etc.).

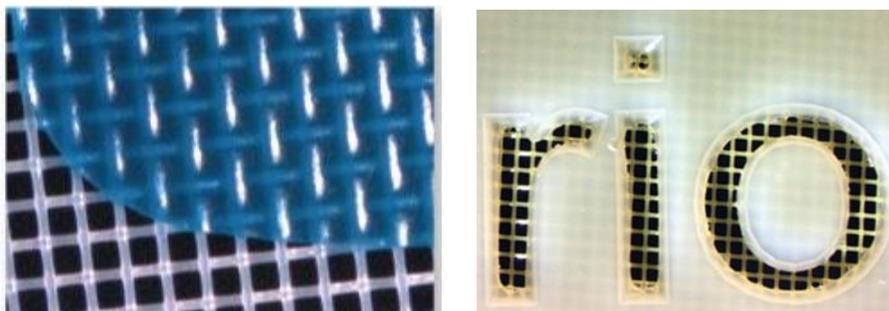


Figura 27 - Figuras en pantallas. La imagen anterior es un ejemplo de pantallas con hilos de acero expuestos, generando figuras por las cuales posteriormente será transferida una pasta o tinta sobre un sustrato. Fuente: Heraeus, 2019

Goma para impresión (Squegge)

La goma de impresión es el elemento que una vez colocada en la máquina de impresión, es la encargada de mover con algún grado de presión, la tinta a través de las aperturas/figuras del circuito o elemento a procesar, en la pantalla.

La goma de impresión está compuesta principalmente por plástico, que dependiendo del tipo de aplicación tendrá una diferente dureza. Debido a esto, dichas gomas son clasificadas de acuerdo con su dureza, generalmente son identificadas por un color el cual se relación con el grado de dureza de esta. La tabla 4 muestra los tipos más comunes de dureza para las gomas de impresión utilizadas en los procesos de impresión de películas gruesas.

Tabla 4 - Dureza para gomas de impresión

Numero	Dureza
40	Suave
70	Uso típico
80	Para líneas finas
90	Duro

Nota. Dureza para Gomas utilizadas en el proceso de impresión.

En general, entre más duro sea el material de la goma de impresión más delgada será el grosor de impresión, y por lo tanto dará una mejor resolución.

De igual manera, diferentes fabricantes clasifican las gomas de impresión con diferentes colores de acuerdo con la dureza y a la forma de estas. La figura 28 muestra los tipos más comunes de gomas de impresión usadas en el proceso de películas gruesas.

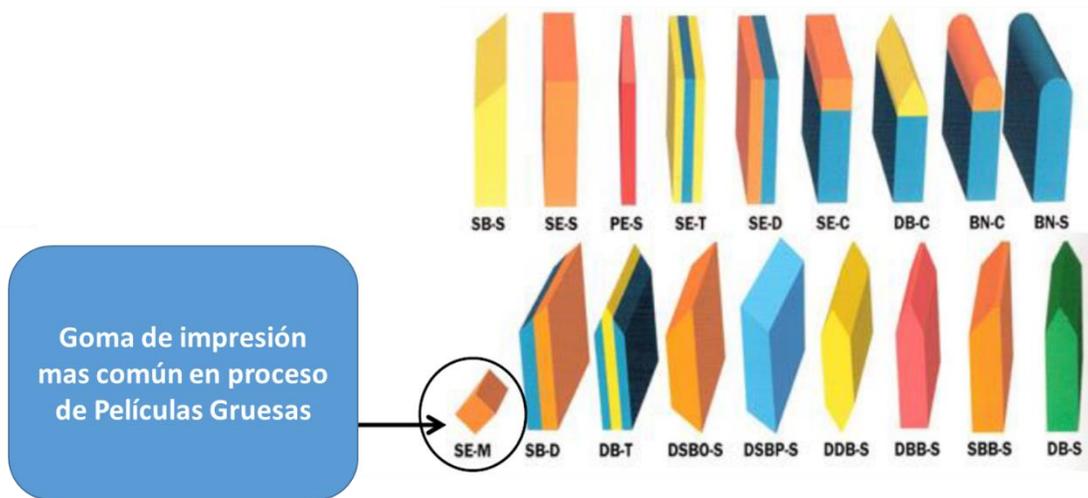


Figura 28 - Gomas de impresión. En la imagen se muestran los tipos más comunes de gomas de impresión, dependiendo de la pasta o tinta a depositar/imprimir y el sustrato utilizado, se utilizará cierto color y forma de goma de impresión. Los colores regularmente representan un grado de dureza, pero varían de acuerdo con el fabricante. Fuente: Heraeus, 2019

Máquina de impresión (Impresora)

La máquina de impresión utilizada en el proceso de películas gruesas es el equipo electromecánico que permite que se realice el depósito de las pastas/tintas sobre el sustrato a utilizar, básicamente por medio de esta máquina de impresión se permite la interacción entre la goma de impresión, la tinta o pasta y la pantalla.

Esta máquina tiene mecanismos que permiten que en ella sean colocadas la goma de impresión y la pantalla, siendo en esta última sobre la cual se depositan las pastas o tintas. Las impresoras permiten que una vez colocadas la pantalla y la goma de impresión, se puedan realizar ajustes en cuanto a velocidad de impresión, fuerza de impresión, ángulo de impresión, recorrido de la impresión, entre otros parámetros, los cuales se verán reflejados en la impresión misma de las pastas sobre el sustrato, como por ejemplo grosor de la impresión, resolución de la impresión, calidad, etc.

Existen diferentes tipos de máquinas para impresión de películas gruesas, pueden ir desde máquinas manuales, semiautomáticas hasta totalmente automatizadas. El uso de una u otra de ellas, dependerá principalmente del volumen de sustratos que se requiera imprimir en un determinado periodo de tiempo. La fotografía 29 muestra una máquina de impresión semiautomática tradicional.



Figura 29 - Máquina de impresión. Máquina de impresión semiautomática utilizada en la manufactura de elementos por proceso de películas gruesas, Fuente: HMI printers, 2019

De igual manera, en la figura 30 se muestran de manera separada las partes principales de la máquina de impresión, donde tenemos el plato donde se coloca el sustrato a imprimir y la pantalla que servirá para realizar la impresión.

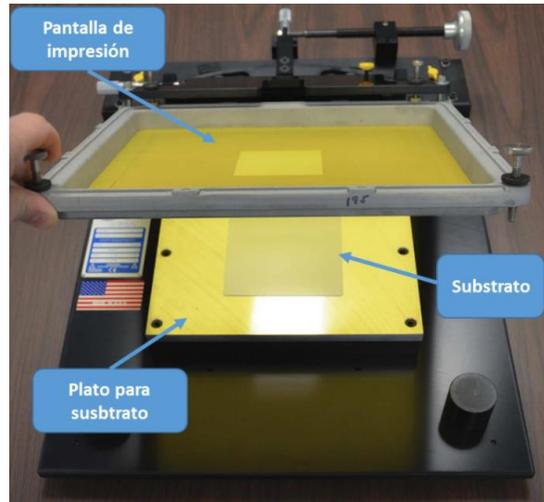


Figura 30 - Pantalla, plato y sustrato. La imagen superior muestra una pantalla, un plato y sustrato colocadas en una máquina de impresión. Una vez se coloque la tinta sobre la pantalla y se inicia el ciclo de impresión, la tinta es transferida al sustrato. Fuente: HMI printers, 2019

Las imágenes en la figura 31 muestran la goma de impresión barriendo la tinta depositada sobre la pantalla, depositando de esta manera la pasta o tinta sobre el sustrato a través de las aperturas de la pantalla, de acuerdo con la figura deseada.

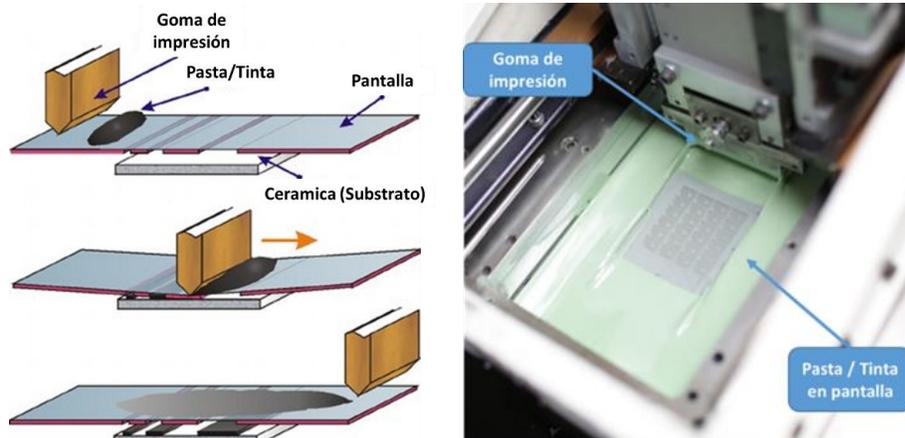


Figura 31 - Representación de impresión. La imagen izquierda muestra el recorrido de una goma de impresión sobre la pantalla mientras aplica presión para depositar pasta/tinta sobre un sustrato. La imagen derecha muestra una máquina de impresión efectuando el mismo proceso de impresión, Fuente: Autoría propia, 2019

Hornos de curado

Finalmente, otro de los equipos principales utilizados dentro de la manufactura de elementos de película gruesa son los hornos de curado. Estos hornos son los encargados de curar (hornear) las pastas/tintas depositadas en los substratos por medio de altas temperaturas, las cuales llegan a alcanzar hasta 850 °C dependiendo del tipo de pasta a curar. La fotografía 32 muestra hornos de curado convencionales utilizados en la mayoría de los procesos de películas gruesas.



Figura 32 - Hornos de curado. Imagen mostrando Hornos de curado convencionales utilizados para el horneado de pastas/tintas en proceso de películas gruesas, Fuente: HMI printers, 2019

Los hornos de curado constan de diferentes zonas las cuales alcanzan diferentes temperaturas que van desde los 50 hasta los 850 °C. A través de estas zonas, las pastas pasan durante diferentes procesos químicos que le permiten adherirse al substrato.

La primera etapa durante el proceso de curado es conocida generalmente como etapa de “Secado”, en ella se evaporan la mayor parte de los vehículos solventes de las pastas/tintas, es decir los diversos elementos orgánicos e inorgánicos de los cuales se compone la pasta y que sirven para contener los componentes funcionales de la misma. Esta etapa alcanza los 150°C y es utilizada en la mayoría de los procesos para películas gruesas.

La duración y temperatura de una zona de secado puede variar de acuerdo con la pasta utilizada, pero regularmente tiene una duración de 10 minutos a una temperatura pico de 150 °C. La figura 33 muestra una rampa de temperatura para una zona típica de secado.

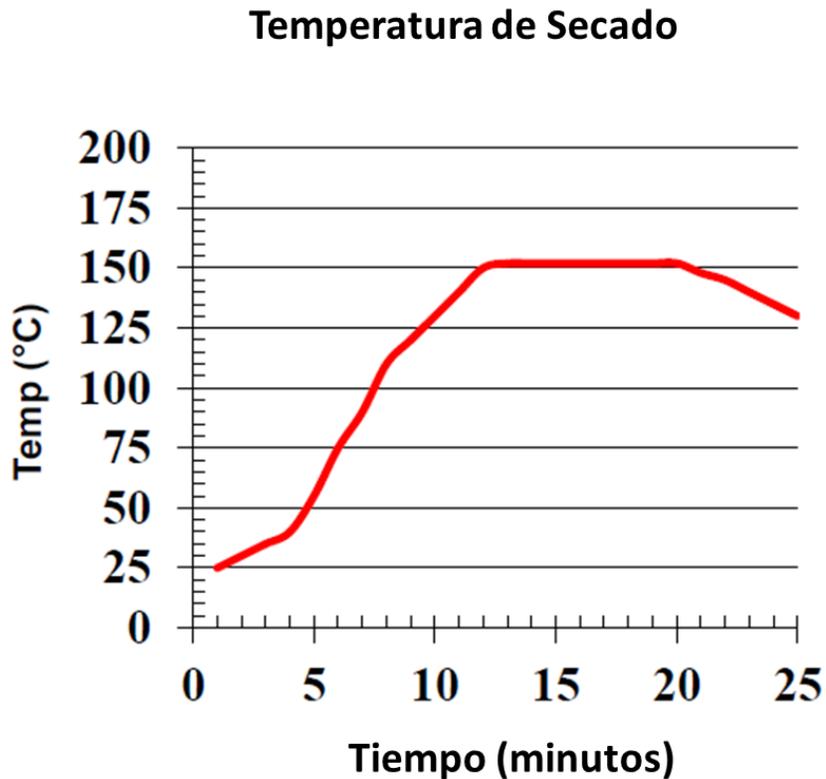


Figura 33 - Rampa de secado. La imagen muestra una rampa para temperatura de secado usualmente utilizada en el proceso de películas gruesas. Fuente: Heraeus, 2019

La segunda etapa en el proceso de curado es conocida como curado, en esta etapa los componentes de la pasta sufren una reacción química por medio de la cual los metales en ella se adhieren al substrato utilizado, alcanzando así sus propiedades funcionales.

La figura 34 muestra una rampa de temperaturas para un horno de curado en la cual se muestran las diferentes etapas y cambios químicos/físicos por los cuales pasa la tinta/pasta a lo largo del horno y sus diferentes temperaturas.

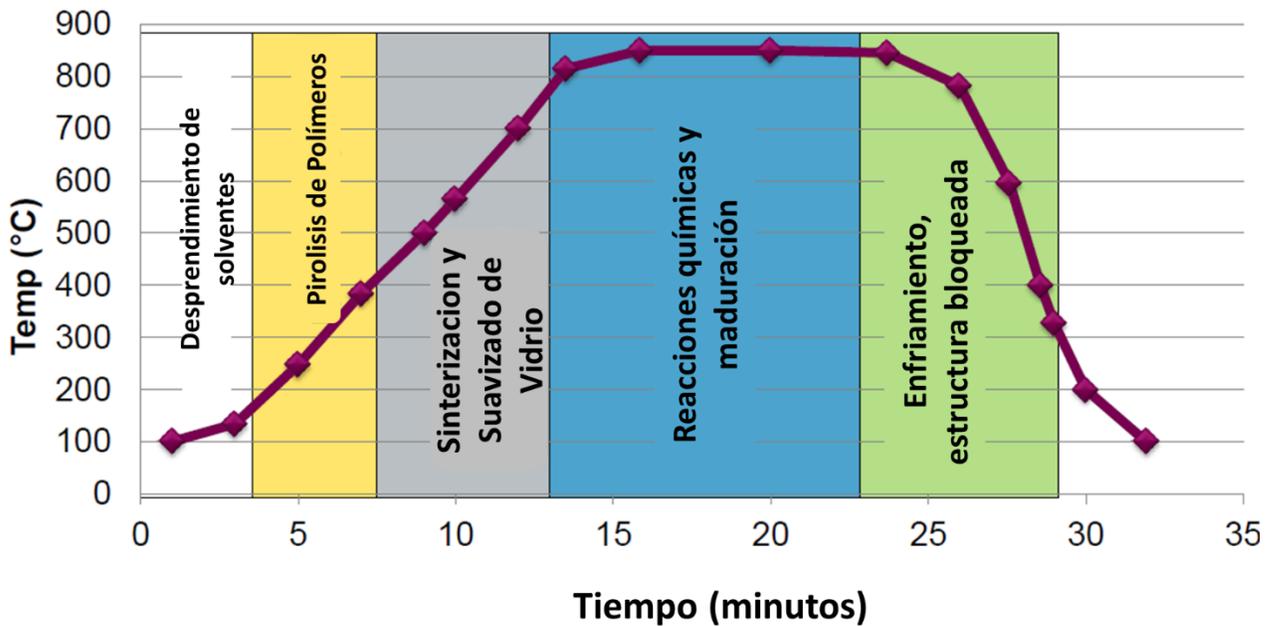


Figura 34 - Etapas de curado en horno. Temperaturas típicas en zonas de curado de horno, desde la etapa de secado, pasando por curado hasta las zonas de enfriamiento. Fuente: Heraeus, 2019

Algunos aspectos importantes por considerar para el correcto funcionamiento de un horno y por lo tanto para asegurar el correcto curado de las pastas/tintas, son por ejemplo verificar la estabilidad de la temperatura en cada una de las zonas del horno. El aire que fluye dentro del mismo debe estar libre de aceites o grasas, contaminantes y partículas.

De igual manera, la banda del horno por la cual son transportados los substratos debe estar limpia.

La figura 35 muestra una representación típica de un horno de curado con sus principales componentes.

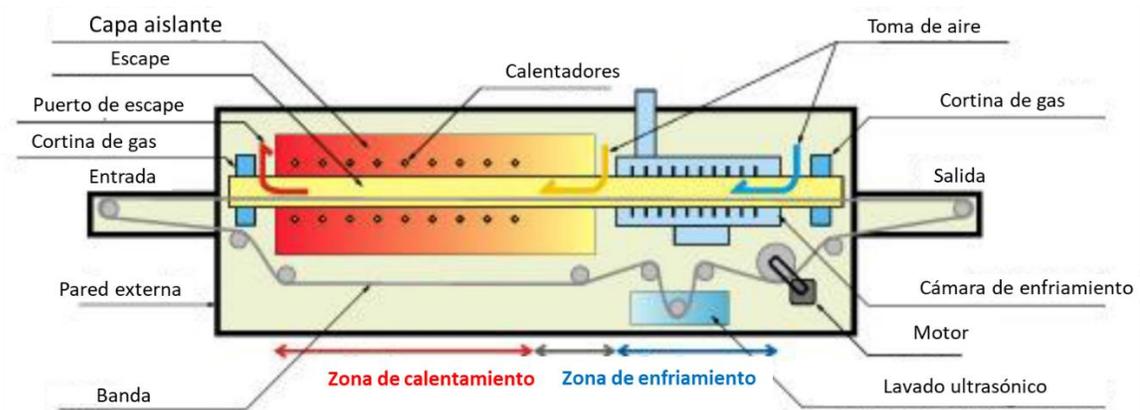


Figura 35 - Componentes de un horno. Principales componentes en un horno de curado utilizado en un proceso de elaboración de elementos de películas gruesas. Fuente: Heraeus, 2019

En resumen y a grandes rasgos, un proceso de película gruesa está compuesto por el uso de tintas y sustratos como materia prima. Por otra parte, en cuanto a equipo o elementos para realizar la impresión tenemos las pantallas que nos sirven para depositar la tinta sobre el sustrato, la goma de impresión y los hornos de curado que permitirán que la tinta sea adherida al sustrato. La figura 36 muestra un proceso simplificado de impresión de película gruesa.

Flujo de proceso de película gruesa

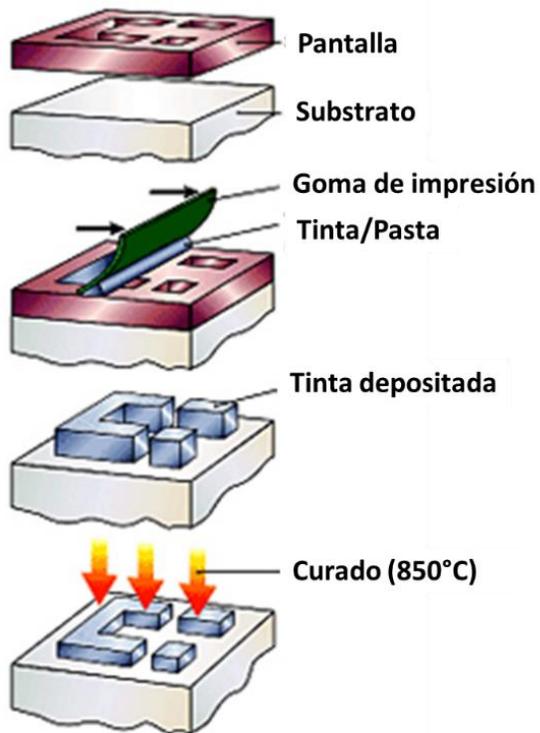


Figura 36 - Flujo de proceso de impresión. La figura muestra el flujo simplificado para un proceso de película gruesa, en donde se observan los principales componentes que intervienen, desde la impresión hasta el curado de la tinta/pasta. Fuente: Heraeus, 2019

2.3. Pruebas de desempeño y confiabilidad

Como en cualquier otro proceso en el cual se elabora un producto, en este caso un componente electrónico, se requiere que una vez se ha finalizado el proceso de manufactura de este, sea sometido a distintas pruebas de funcionalidad y desempeño. Existen diferentes tipos de pruebas dependiendo del componente, en nuestro caso el elemento bajo estudio es una resistencia electrónica de tipo montaje superficial.

Durante el desarrollo del producto, se requieren pruebas de validación las cuales nos ayudan a confirmar una garantía de confiabilidad con respecto al funcionamiento, resistencia del elemento, sometimiento a factores externos como el medio ambiente y también el comportamiento de este en caso de una interacción mecánica con algún otro dispositivo. Algunos ejemplos de pruebas de verificación y validación se presentan a continuación:

- Prueba de voltaje de operación: El elemento es sometido al voltaje de operación para el cual fue diseñado por una cantidad de tiempo definida para confirmar cualquier degradación en su funcionamiento.
- Prueba de ciclo térmico: El objetivo de esta prueba es determinar la habilidad del elemento para resistir temperaturas extremadamente bajas y altas sin afectar su funcionamiento.
- Prueba de choques térmicos: Similar a la prueba de ciclo térmico, esta prueba expone al elemento a cambios bruscos de temperatura en cortos ciclos de tiempo para acelerar posibles fallas que pudiera presentar el producto en condiciones de uso normal.
- Prueba de Resistencia a humedad: Prueba similar a las pruebas de ciclo térmico, con la diferencia que se agrega la variable de la humedad aparte de la temperatura. Esto con el fin de inducir una falla prematura en el elemento debido a problemas durante su procesamiento.

- Pruebas de durabilidad: Como su nombre lo indica, es una prueba relacionada a determinar el tiempo mínimo/máximo en el cual un elemento, en nuestro caso una resistencia, puede mantenerse operando bajo condiciones controladas manteniendo a la vez sus propiedades funcionales.
- Pruebas de caída: Prueba en la cual se somete el elemento a caídas, ya sea con o sin empaque de protección, para verificar la resistencia a impactos físicos.
- Prueba de soldabilidad: La prueba de soldabilidad es el proceso mediante el cual se evalúa la capacidad de las terminales (pines, cables, alambres, bloques) para retener o permitir la adhesión de soldadura en su superficie.

Dichas pruebas de desempeño y confiabilidad pueden ser llevadas por medio de diferentes controles para tener una rastreabilidad de los resultados, por ejemplo, pueden ser realizadas por medio de lotes, cantidad definida de piezas, por fechas, por las materias primas que lo componen, etc.

La prueba de soldabilidad es la cual está relacionada a un defecto en la manufactura del elemento (resistencia) objeto de estudio en esta investigación. Por lo cual en los capítulos siguientes se abordarán más detalles referentes a este tipo de prueba, como principales características, criterios y estándares de evaluación.

2.3.1. Prueba de soldabilidad

Las pruebas de soldabilidad se refieren al proceso de evaluación de la soldabilidad de las terminaciones (es decir, terminales de componentes, terminales, cables, etc.). Los

estándares de la industria para realizar pruebas de soldabilidad incluyen principalmente los siguientes: 1) Mil-Std-883 Método 2003 - "Soldabilidad"; 2) IPC / JEDEC J-STD-002 - "Pruebas de soldabilidad para conductores de componentes, terminaciones, terminales y cables".

La capacidad de soldabilidad de una superficie se define por sus características de humectación de soldadura. La humectación de la soldadura se refiere a la formación de una película de soldadura relativamente uniforme, lisa e ininterrumpida que exhibe una excelente adherencia sobre la superficie soldada.

Superficies No humectadas, por otro lado, es la condición en la que el recubrimiento de soldadura ha contactado la superficie, pero no logra adherirse completamente a ella, haciendo que la superficie o una parte de esta quede expuesta.

La "Des humectación" es la condición en la que la soldadura retrocede después de recubrir una superficie, creando montículos irregulares de soldadura, pero sin dejar áreas expuestas.

Hay varias formas en que se realizan las pruebas de soldabilidad, pero los dos métodos más utilizados son: 1) el Método de inmersión y apariencia; y 2) Análisis de equilibrio de humectación. En ambas pruebas, las muestras se someten a un proceso acelerado de 'envejecimiento' antes de ser probado para la capacidad de soldabilidad, para tener en cuenta los efectos naturales de envejecimiento del almacenamiento antes de ser montados en placa o el elemento donde será utilizado el componente.

El método de Inmersión y apariencia, que se usa ampliamente en el control de calidad del proceso y el monitoreo de confiabilidad, es un proceso de prueba cualitativa, es decir el juicio sobre si una muestra pasa o no la prueba se basa en los atributos físicos y visuales que exhibe el elemento.

El análisis del equilibrio de humectación, por otro lado, es una prueba cuantitativa, es decir, mide las fuerzas de humectación impuestas por la soldadura fundida en la superficie de prueba a medida que se sumerge y se mantiene en el baño

de soldadura en función del tiempo y se gráfica. La grafica inicia comienza con la fuerza de humectación negativa (condición no húmeda), la cual aumenta hasta que cruza el eje cero de fuerza de humectación, lo que indica que se ha humedecido de soldadura. El tiempo que tarda la humectación en ocurrir es un parámetro utilizado para evaluar la capacidad de soldadura. Sin embargo, no existen criterios establecidos de aprobación / falla estándar de la industria para el método de análisis equilibrio de humectación, razón por la cual se utiliza principalmente como herramienta de ingeniería y no como un monitoreo de producción. La fuerza de humectación de soldadura depende de la densidad y la tensión superficial de la soldadura.

Estándar JEDEC J-STD-002 - Prueba de Soldabilidad

El Método JEDEC J-STD-002 es uno de los estándares más antiguos y utilizados para las pruebas de soldabilidad.

Esta norma prescribe métodos de prueba, definiciones de defectos, criterios de aceptación e ilustraciones para evaluar la capacidad de soldadura de cables, terminaciones, cables sólidos, cables trenzados, terminales y lengüetas de componentes electrónicos. Esta norma también incluye un método de prueba para la resistencia a la disolución / des humectación de la metalización. Dicho estándar está destinado a ser utilizado tanto por el vendedor como por el usuario.

Las evaluaciones de soldabilidad se realizan para verificar que la soldabilidad de los cables y terminaciones de los componentes cumpla con los requisitos establecidos en esta norma y para determinar que el almacenamiento no ha tenido un efecto adverso sobre la capacidad de soldar componentes a un sustrato de interconexión. La determinación de la capacidad de soldadura se puede hacer en el momento de la fabricación, al recibir los componentes por el usuario o justo antes del montaje y la soldadura.

La resistencia a la disolución de la determinación de la metalización se realiza para verificar que las terminaciones metalizadas permanecerán intactas durante los procesos de soldadura del ensamblaje llevado cabo por el cliente final.

Dentro del estándar JEDEC J-STD-002 existen diferentes criterios de aceptación para la prueba, que varían de acuerdo con el tipo de componente a evaluar, desde elementos sin terminales, hasta elementos con cables, terminales o alambres.

El Método JEDEC J-STD-002 emplea el Método de Inmersión y Aspecto, que básicamente utiliza el siguiente equipo:

- 1) Un recipiente de soldadura de tamaño suficiente que pueda mantener la soldadura a una temperatura específica.
- 2) Mecanismo o herramienta para la inmersión de las partes bajo prueba, así como un dispositivo para controlar el tiempo de permanencia de las terminaciones.
- 3) Un sistema óptico y de iluminación que facilita la inspección con un aumento mínimo de 10X.
- 4) Equipo de envejecimiento por vapor para 'envejecer' las muestras antes de la prueba.

El procedimiento de prueba de soldabilidad general consta de los siguientes pasos:

- 1) Preparación adecuada de las muestras, sin incluir limpieza, limpieza, raspado o limpieza abrasiva de las terminaciones a analizar.
- 2) Envejecimiento de las muestras en un vapor de vapor, que consiste en exponer las superficies a analizar al vapor de agua durante 8 horas y secarlas horneando a 100 ° C durante no más de 1 hora en una atmósfera seca o secarlas al aire a temperatura ambiente durante un mínimo de 15 minutos.
- 3) Aplicación adecuada de flux a las terminaciones.

4) Inmersión de soldadura, que consiste en sumergir las terminaciones en soldadura estática a una temperatura uniforme de 245 ± 5 grados C; y 5) examen de las terminaciones en 10-15X.

El criterio principal para una capacidad de soldadura aceptable es una cobertura del 95% de la porción sumergida de las terminaciones mediante un recubrimiento de soldadura nuevo y continuo. Por lo tanto, los poros, huecos, porosidad, no humectación o humectación no deben exceder el 5% del área total sumergida.

Cuando una condición de pobre soldabilidad se presenta en un grado considerable, el efecto que puede presentar al momento de ser utilizada en el ensamble final es una baja adherencia de la soldadura en las áreas de contacto del elemento y, por lo tanto, un riesgo de que los componentes ensamblados presenten desde una falla intermitente hasta una falla total de dispositivo en el cual fue ensamblado.

Las imágenes en la figura 37, muestran los efectos de una condición de soldabilidad no deseada. Si estos elementos fueran sometidos a una prueba de soldabilidad, es muy probable que fueran rechazados debido a que la soldadura no se adhiere o no humedece lo suficiente el componente

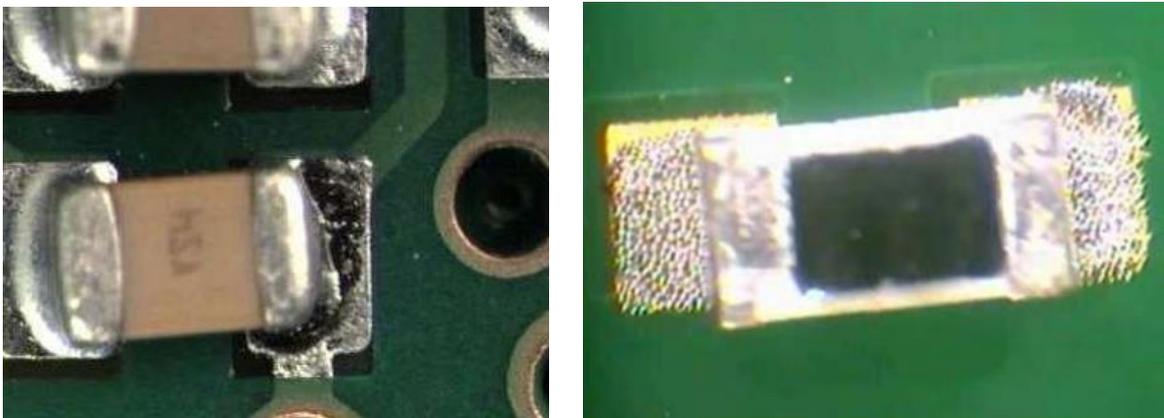


Figura 37 - Efectos de mala soldabilidad. La figura superior muestra un capacitor cerámico en el cual la soldadura no se adhiere completamente al área de contacto del componente. La imagen inferior muestra una resistencia cerámica en la cual de igual manera la soldadura no humedece o no cubre completamente la superficie de contacto del elemento. Fuente: Visión Engineering, 2020

2.4. Marco de Referencia

2.4.1. Proceso de manufactura de resistencia Physio 68156

Una vez presentados de manera general en el capítulo anterior, el proceso de manufactura y los materiales usados en la elaboración de elementos de montaje superficial, en este capítulo se detallará el proceso de manufactura utilizado en la manufactura de la resistencia PN: 68156-4K7JE, la cual es el objetivo de esta investigación. Como referencia, en el anexo 1 se muestra el dibujo de Ingeniería bajo el cual se definen los requerimientos para el componente PN: 68156-4K7JE, de igual manera en el anexo 2 se incluyen los diseños de las diferentes capas utilizadas para las impresiones de las diferentes tintas.

Se definirán primeramente los pasos y materiales que forman parte de esta resistencia para posteriormente abordar el problema de soldabilidad presentado en la misma.

A manera de representación, la figura 38 muestra las distintas capas/impresiones de las cuales está formado el PN:68156-4K7JE, después la figura 39 muestra el componente final en un modelo por computadora.

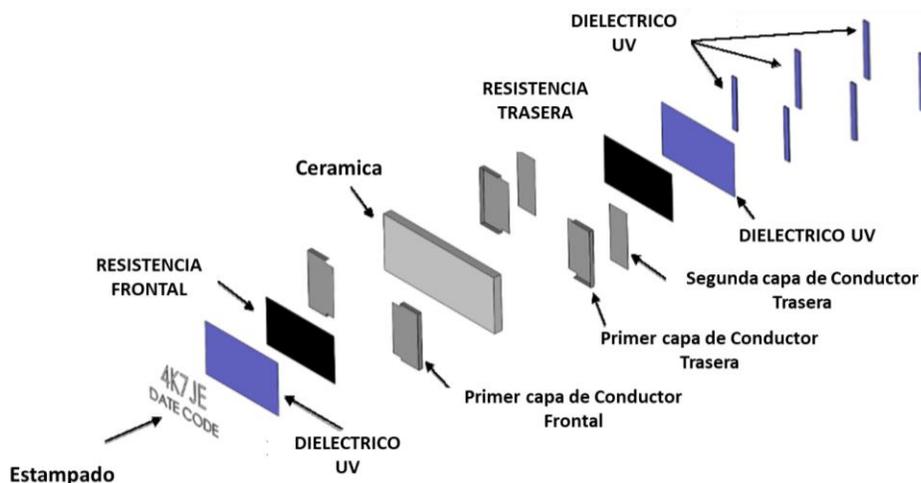


Figura 38 - Capas de impresión 68156. La imagen muestra las diferentes capas de tinta depositadas y curadas en el componente resistivo. Fuente: Ohmite, 2020

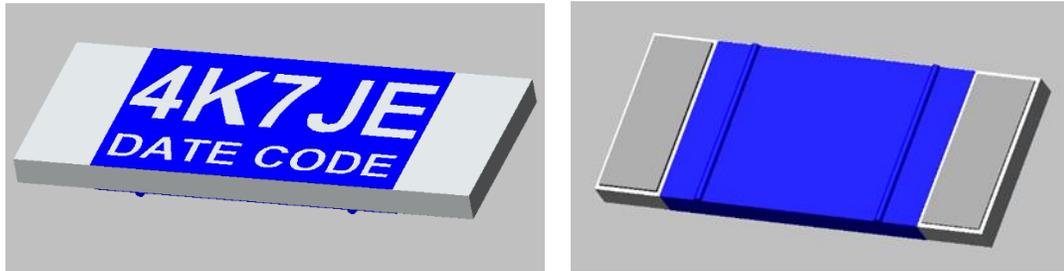


Figura 39 - Modelo 3d de 68156. La imagen muestra el modelo 3D de la resistencia 68156-4K7JE una vez que se ha completado el proceso de elaboración. Parte frontal (izquierda.) y trasera (derecha.), Fuente: Ohmite, 2019

2.4.2 Descripción del proceso de elaboración para resistencia 68156

Como se mostró en el capítulo anterior, el proceso de impresión de películas gruesas se lleva a cabo mediante una serie de pasos consecutivos, los cuales pueden resumirse en un ciclo iterativo de un depositado de la tinta (impresión), secado y curado. Estos pasos se llevan a cabo de manera repetitiva y consecutiva hasta completar las impresiones necesarias.

En este capítulo se describe de manera general el proceso de manufactura para el número de parte 68156-4K7JE el cual es objeto de estudio. Se describen las principales operaciones, así como el orden en el cual se imprimen y se hornean las diferentes capas de tinta utilizadas en el proceso.

Existen operaciones complementarias aparte del proceso de impresión o depositado, como por ejemplo la prueba eléctrica, la separación de los elementos del sustrato y el empaque. Pero debido a que todas estas etapas no tienen relación con el problema objeto de estudio, el capítulo se centrará únicamente en las operaciones que intervienen directamente con la manufactura del componente resistivo.

Mencionado lo anterior, en la figura 40 se muestra el flujo con las principales etapas en la elaboración de la resistencia número de parte 68156-4K7JE.



Figura 40 - Diagrama de bloques. Diagrama de bloques básico para un proceso de Impresión de Película Gruesa de resistencia (autoría propia, 2019).

La figura 41 muestra el diagrama de flujo del proceso utilizado para manufacturar la resistencia 68156-4K7JE. Como vemos en este diagrama, las operaciones principales son relacionadas a la impresión (depositado de tinta) y curado por medio del horno de alta temperatura.

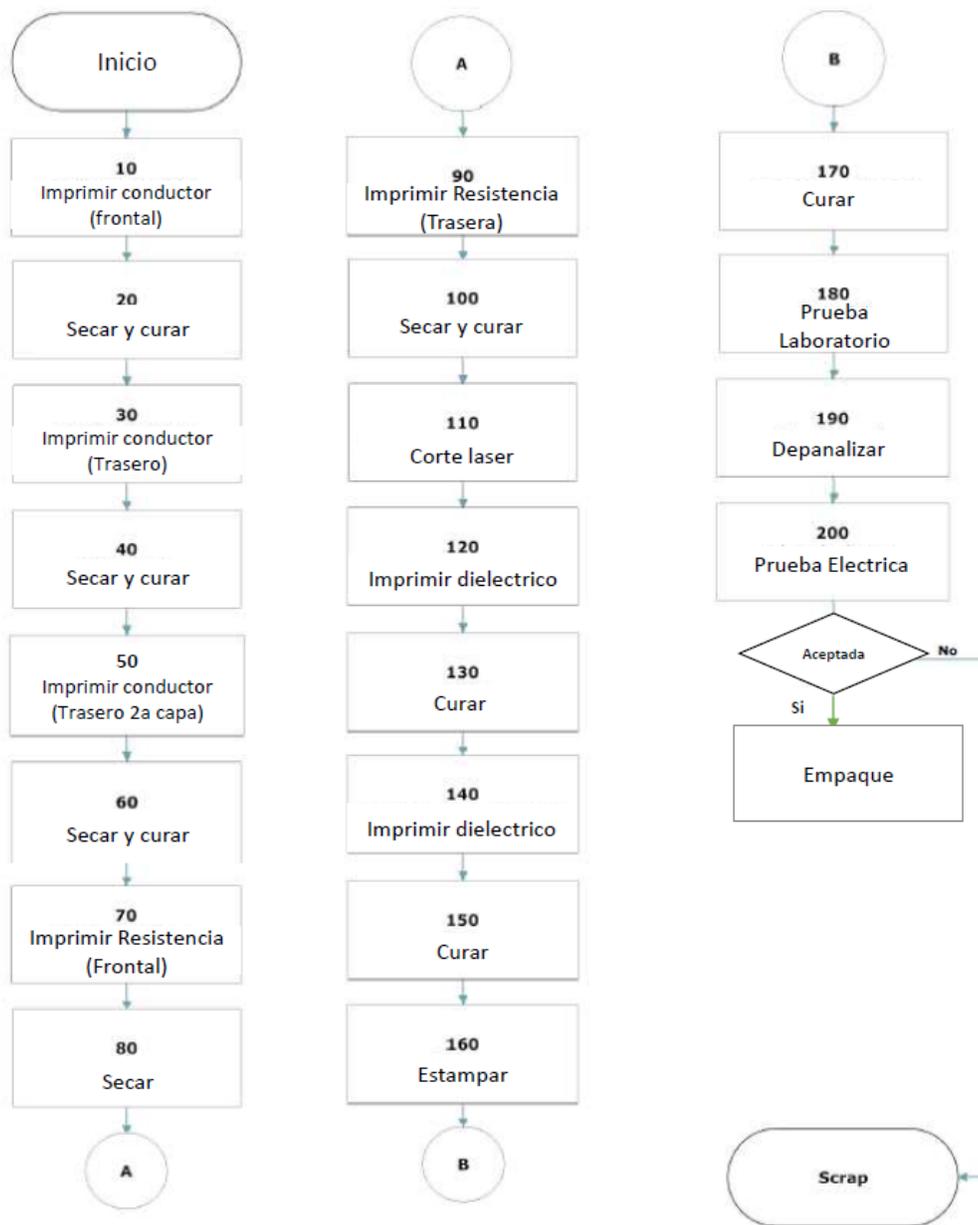


Figura 41 - Diagrama de flujo proceso de Impresión de Película Gruesa para 68156-4K7JE (autoría propia 2019)

El primer paso en el proceso de impresión del PN:68156-4K7JE, consiste en preparar la pantalla que contendrá la figura a imprimir en el sustrato, la figura 42 muestra la pantalla de impresión utilizada para este número de parte. En la pantalla se puede observar el patrón de figuras correspondientes a la primera capa de impresión, la cual corresponde a la capa de conductor.



Figura 42 - Pantallas de impresión para 68156. Pantallas de impresión para PN:68156-4K7JE, correspondientes a la capa de tinta conductora. En la pantalla se observan las figuras que corresponden a una matriz de rectángulos a través de los cuales se depositará tinta sobre el sustrato. (autoría propia)

La pasta conductiva o conductora es aplicada sobre la cerámica mediante el uso de la máquina impresora. Primero se realiza un ajuste de la pantalla en la máquina de impresión para alinear la pantalla contra la cerámica a manera de realizar una impresión de la figura en la pantalla de manera alineada sobre cerámica.

Posteriormente se procede a colocar una cantidad aproximada de 100 g de tinta conductora PN: D99I070 sobre la pantalla y después se coloca el sustrato sobre el plato de impresión, el cual servirá como guía y será sujetado por medio de vacío, esta etapa del proceso es mostrada por medio de la figura 43.

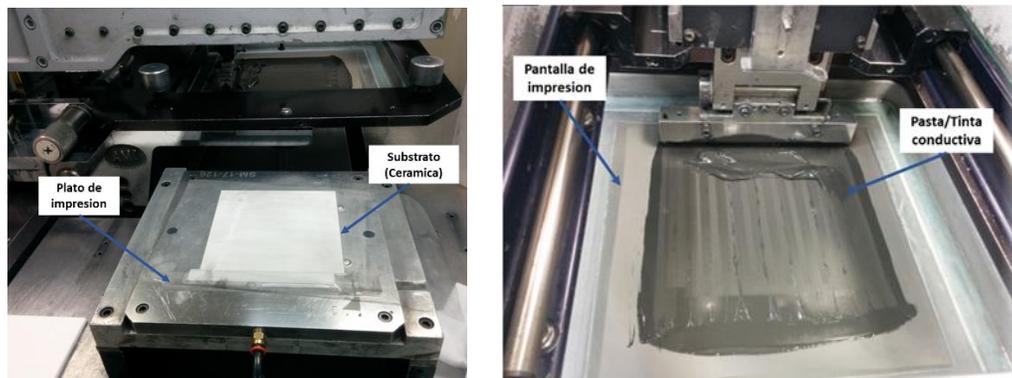


Figura 43 - Proceso depositado de tinta. La figura muestra el proceso de depositado de tinta conductora en sustrato de cerámica, en esta etapa se aplica la primer capa frontal y trasera de conductor. (Autoría propia 2019)

Una vez que se ha terminado el ajuste de la maquina impresora, se procede a realizar el depositado de la tinta de conductor sobre el sustrato.

Posteriormente al terminar la aplicación del conductor, el sustrato de cerámica es horneado a una temperatura pico de 850 °C por 10 minutos, todos esto se realiza de acuerdo con los requerimientos de la hoja técnica de la tinta conductiva. Una vez que la cerámica es horneada, la tinta conductora se ha adherido al sustrato y pasa de una pasta liquida a una capa solida de color brillante, la figura 44 muestra un sustrato con la primera capa de conductor frontal y trasera horneada.



Figura 44 - Capa conductora frontal y trasera. Primera capa conductiva Frontal y Trasera, aplicada y horneada sobre el sustrato de cerámica. El conductor se ha adherido al sustrato por medio del proceso de horneado. (Autoría propia 2019)

El segundo paso en la elaboración de la resistencia 68156-4K7JE consiste en depositar una segunda capa de pasta conductora únicamente en la parte trasera del sustrato. El procedimiento es muy similar a la aplicación de la primera capa de conductor, con la diferencia de que el patrón o la figura en la pantalla es diferente, ya que la tinta conductora requiere ser depositada en un área diferente.

Siguiendo el mismo procedimiento de ajuste, se procede a imprimir o depositar la tinta para formar la segunda capa de conductor sobre la parte trasera del sustrato y se vuelve a curar en el horno de alta temperatura, igualmente a 850°C por un periodo de 10 minutos, nuevamente todo este proceso de acuerdo con la hoja técnica del fabricante de la tinta/pasta.

Una vez que la segunda capa de conductor aplicada en la parte trasera del sustrato ha sido horneada, la capa estará adherida sobre la primera capa de conductor trasero. En la figura 45 se muestra la capa de conductor trasera una vez curada a alta temperatura.

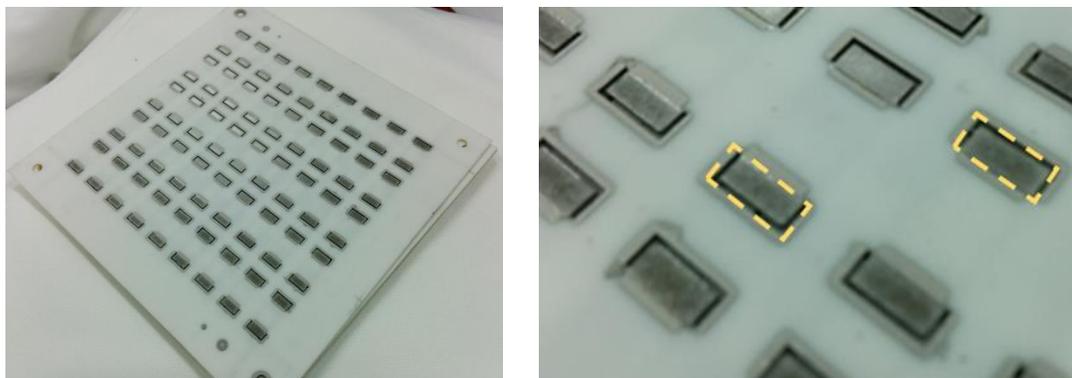


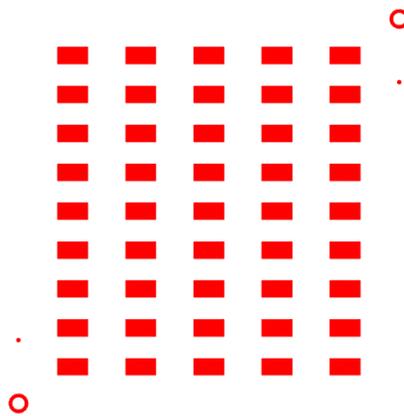
Figura 45 – Segunda capa conductora trasera. Segunda capa conductiva Trasera, aplicada y horneada sobre el sustrato de cerámica (Izquierda). La imagen a la derecha muestra un acercamiento al patrón de figuras impresas sobre el sustrato en las áreas amarillas. (Autoría propia 2019)

Hasta esta parte del proceso, se ha concluido con el depositado/impresión de la tinta conductora en la cerámica. Las capas conductoras en la cerámica serán la responsable de permitir que el elemento final pueda ser ensamblado posteriormente en un circuito electrónico por medio del uso de soldadura.

Posteriormente, la tercera capa de tinta aplicada a la cerámica es la capa de resistencia. Esta es una tinta resistiva la cual dará un valor resistivo de 4.7 Kohm con una tolerancia de $\pm 5\%$, es decir que una vez que la tinta de resistencia sea depositada y horneada, al salir del horno esta será medida por medio de un multímetro para comprobar que su valor se encuentra entre 4.46 y 4.93 Kohm.

El proceso de impresión de la capa resistiva es similar a la capa de conductor, pero utilizando una pantalla con el patrón geométrico para la impresión de la resistencia y utilizando de igual manera la tinta resistiva correspondiente (Figura 46)

En el anexo 2 muestra el diseño de impresión que será trasferido a la Cerámica por medio de la pantalla de impresión.



(3) RESISTOR FRONT AND BACK 1 68156 REV C 10/24/18

Figura 46 - Diseño capa de resistencia. La imagen muestra el diseño que será transferido sobre la Cerámica por medio de la pantalla de impresión, utilizando una tinta resistiva. (Autoría propia 2020)

De igual manera, la figura 47 muestra el ejemplo de una tinta resistiva, en la cual podemos observar el valor resistivo de la misma. Aun cuando el valor de la tinta (5.03 kilo ohmio) es más alto que el valor requerido final en el elemento, esto es algo normal en los procesos de película gruesa. Los valores teóricos de las tintas resistivas pueden tener una diferencia contra el valor impreso, esto es debido a factores como el material sobre el cual se deposita la tinta, así como las condiciones ambientales y variaciones en el proceso de horneado.

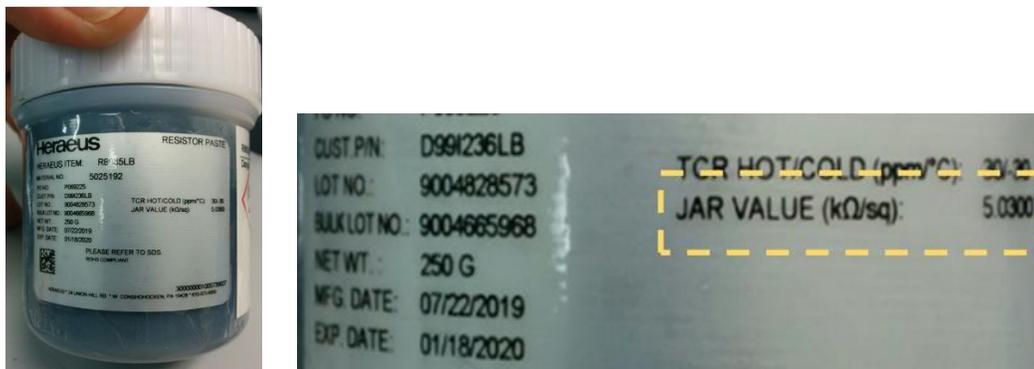


Figura 47 - Tinta resistiva. La imagen muestra un ejemplo de un contenedor para tinta resistiva utilizada en la elaboración del PN: 68156-4K7JE. (Autoría propia 2020)

La cuarta capa que se aplica sobre la cerámica es la correspondiente a la tinta de dieléctrico. Esta tinta tiene la función de actuar como un aislante eléctrico y a la vez como una capa protectora física contra los elementos externos.

Como aislante eléctrico evita que la corriente que fluye a través de la capa resistiva pueda escapar o causar un corto al entrar en contacto accidentalmente con algún otro componente. Su función de capa física protectora es evitar que agentes externos como polvo o tierra puedan deteriorar o afectar el funcionamiento de la capa resistiva.

La figura 48 muestra un sustrato con la capa de tinta de dieléctrico depositado sobre ella.

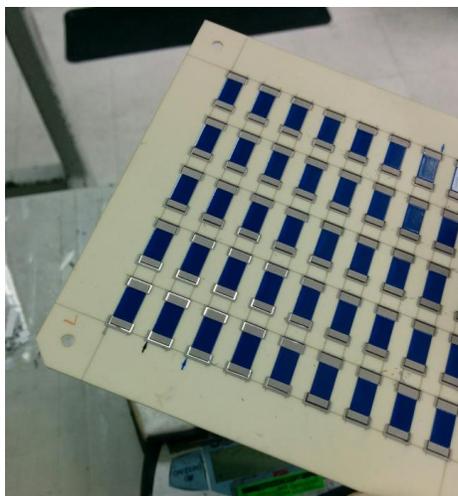


Figura 48 - Substrato con dieléctrico. La imagen muestra un ejemplo de un sustrato cerámico con la cuarta capa de dieléctrico depositada sobre ella, como parte de la elaboración del PN: 68156-4K7JE. (Autoría propia 2020)

Como parte del proceso y a la vez un requerimiento del cliente para poder identificar y rastrear el elemento resistivo una vez que el cliente lo ha recibido y lo utiliza en su ensamble, todos los elementos resistivos del sustrato son identificados por medio de un estampado. Por medio del estampado es posible identificar el número de parte del componente, así como la fecha en la cual fue manufacturado, esto puede ser de gran ayuda ante algún problema de campo simplemente como diferenciación de productos similares.

La tinta de estampado está hecha a base de polímeros (plásticos), por lo cual no tiene ninguna interacción con ninguna de las otras capas usadas en el elemento resistivo. Las tintas de estampado pueden ser de diferentes colores dependiendo del diseño o requerimiento.

El proceso para realizar un estampado identificador es similar al de las otras capas, utilizando una tinta y por medio de una pantalla de impresión.

La operación de estampado consiste en imprimir sobre el elemento una fracción de lo que sería el número de parte (PN:68156-4K7JE) y un código de fecha. Para el caso del elemento procesado, por dibujo se tiene asignado como identificador el número “4K7JE” (sin apostrofes) y para el código de fecha se asigna bajo cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos corresponden a las dos últimas cifras del año de manufactura y los dos últimos dígitos corresponden al número de la semana de manufactura, los cuales van desde la semana 01 hasta la semana 52 del año. En la figura 49 se muestra un ejemplo de un substrato con el estampado sobre cada elemento, dicho estampado muestra el número de parte (4K7JE) y el código de fecha (1814).

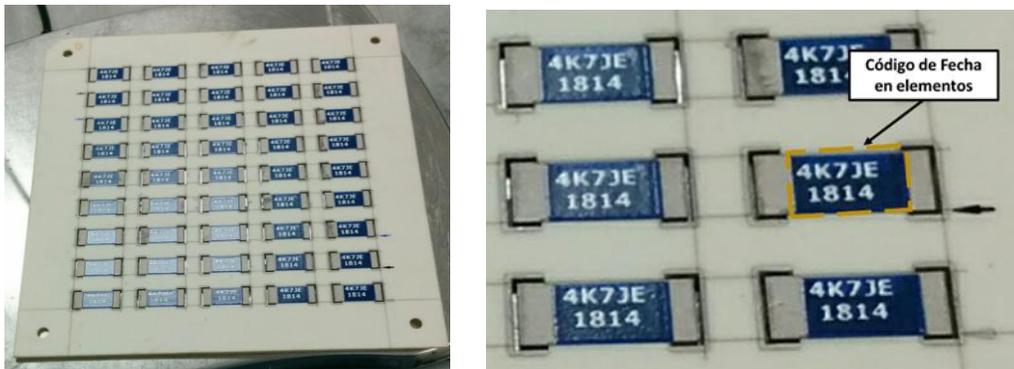


Figura 49 - cerámica con estampado. La imagen muestra un ejemplo de una cerámica con un proceso de estampado. El estampado contiene el número de parte en el área superior (4K7JE) y el código de fecha en la parte inferior (1814). (Autoría propia 2020)

Finalmente, una vez que la cerámica ha sido procesada en cuanto a la impresión o depósito de tintas, se procede a separar cada uno de los elementos para posteriormente pasarlas a diferentes pruebas, entre las que se encuentra la prueba de valor eléctrico y la prueba de soldabilidad. La figura 50 muestra los elementos una vez separados individualmente.

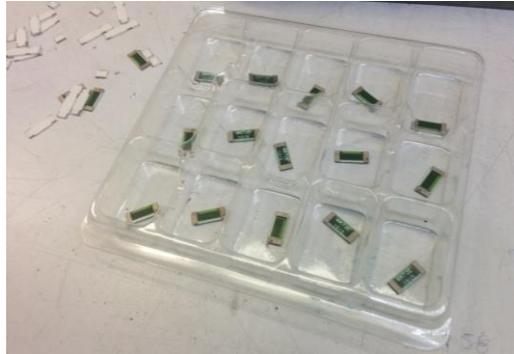


Figura 50 - Elementos separados individualmente. La imagen muestra los elementos separados individualmente de la cerámica una vez que se ha completado el proceso de impresión. (Autoría propia 2020)

2.4.3 Situación actual para prueba de soldabilidad

La investigación para desarrollar consiste en reducir el defecto de soldabilidad, el cual es identificado por medio de una prueba que se hace al azar sobre una cantidad determinada de los elementos una vez separados de la cerámica, de acuerdo con la cantidad producida de los mismos.

La prueba está basada en la norma J-STD-002D (Pruebas de Soldabilidad para Cables de componentes, terminaciones, terminales y cables) el cual fue mencionado en el capítulo 2.5.5. Dicha norma es utilizada en la industria electrónica para establecer criterios de aceptación para diferentes tipos de elementos que requieren ser ensamblados por medio de soldadura en diferentes aplicaciones. Nos permite evaluar la capacidad de soldadura de cables, terminales y cables sólidos.

Esta norma también incluye un método de prueba para la resistencia a la disolución/des humectación de la metalización. Este estándar está destinado a ser utilizado tanto por el fabricante de componentes electrónicos como por el usuario final.

En el caso de la resistencia PN: 68156-4K7JE, la evaluación se realiza para verificar que la soldabilidad de las áreas de conductor de la resistencia cumpla con los requisitos establecidos en esta norma. De igual manera, siendo Victoreen de México el fabricante, la capacidad de soldadura se hace al momento de concluir con la fabricación para de esta manera confirmar que el usuario/cliente no tendrá problemas durante el montaje y la soldadura del componente en su aplicación.

La investigación se hace necesaria ya que, durante el desarrollo de producto, se observó que las muestras que eran sometidas a la verificación de soldabilidad no pasaban dicha prueba, por lo cual inicialmente se generaba un desperdicio del 100% de los elementos procesados ya que no podían ser enviados al cliente con la prueba de soldabilidad rechazada.

La imagen 51 muestra el ejemplo de un elemento rechazado en la prueba de soldabilidad. Como se puede observar, la soldadura no se adhiere completamente a

toda el área de conductor del elemento y muestra áreas ya sea con vacíos o con una cantidad reducida de soldadura.

De acuerdo con el estándar J-STD-002D, la soldadura debe cumplir por lo menos un 95% del área de contacto en base a una verificación visual. El área mostrada corresponde a la parte inferior o trasera de la resistencia número de parte 68156-4K7JE, la cual es el área que es utilizada por el cliente para poder soldar a la resistencia una su tablilla electrónica.

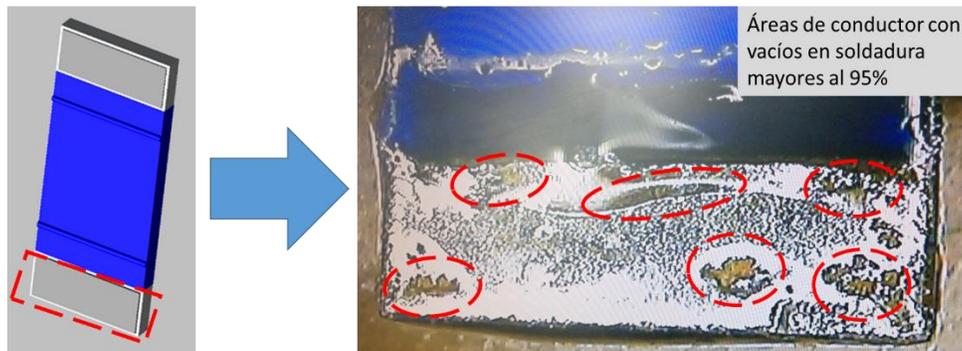


Figura 51 - Elemento después de prueba de soldabilidad. La imagen superior derecha muestra una resistencia después de haber sido sometida a la prueba de soldabilidad de acuerdo con el estándar J-STD-002D. El elemento es un ejemplo de una pieza rechazada debido a que muestra espacios sin soldadura menores al 95% del requerido por el estándar. (Autoría propia 2020)

Método de Clasificación

El estándar J-STD-002D describe los métodos por los cuales las terminales o áreas del componente resistivo pueden ser evaluadas en cuanto a la propiedad de soldabilidad. Para el caso de la resistencia PN: 68156-4K7JE se utilizará el método de evaluación B, el cual es utilizado para evaluar componentes sin terminales por medio del método de sumergimiento en soldadura y que serán ensamblados utilizando soldadura libre de plomo.

Para el número de parte 68156-4K7JE de acuerdo con el manual de J-STD-002 en la sección 1.3.1 la evaluación visual será en base al método de prueba B1 (Test B1 en inglés), ya que el componente resistivo será ensamblado en una aplicación con soldadura libre de plomo, por lo tanto, la prueba de soldabilidad debe ser realizada con el mismo tipo de soldadura.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Población y Muestra

La población con la cual se realizó la investigación correspondió a una orden de producción de resistencias eléctricas del PN:68156-4K7JE producidas en la planta de manufactura de Victoreen de México en un lapso de aproximadamente una semana por una cantidad aproximada de 1440 piezas. Ver relación de órdenes y piezas en la tabla 5.

Todas estas piezas fueron producidas con los mismos materiales, y el mismo equipo de producción, donde únicamente se realizaron ajustes en cuanto a temperaturas y grosores de acuerdo con el experimento más adelante desarrollado.

De acuerdo con la teoría de muestreos, el muestreo utilizado para la presente investigación es un muestreo no probabilístico estratificado, debido a que, en cada grupo del diseño de experimento, se tomarán muestras de diferentes tipos de grupos los cuales estarán identificados de acuerdo con las características de proceso de cada uno de ellos con referencia al diseño de experimentos (William Mendenhall, 2010).

Tabla 5 - Orden para experimento

Numero de orden	Cantidad	Comentarios
M790325	16	16 substratos, 90 piezas por cada substrato
Total	1440	

3.2. Tipo de estudio

El tipo de investigación se considera como un estudio correlacional ya que el principal objetivo consiste en determinar la relación entre las variables independientes y dependientes que tienen un efecto en la característica de soldabilidad. Es decir, mediante la manipulación de las variables independientes se podría establecer un efecto en las variables dependientes. La población utilizada en la investigación se considera finita ya que el experimento está basado en los datos obtenidos a partir de la elaboración de una orden de aproximadamente 1500 piezas.

3.3. Metodología DOE

En esta sección de la tesis, se explica la metodología desarrollada para la aplicación del diseño de experimentos en las industrias. Tras una breve introducción, el capítulo incluye una descripción del enfoque de la metodología desarrollada, explicando su estructura, así como las ventajas y desventajas que presenta sobre otras metodologías existentes en la bibliografía. Posteriormente, se desarrollan los principales bloques que componen la metodología: Principios y Modelo.

En este capítulo se intenta incluir la justificación teórica de cada uno de los componentes y contenidos de esta metodología

La palabra metodología proviene del griego y significa ciencia del método. El término metodología es a veces utilizado como sinónimo de método, el cual se entiende como un modo ordenado de proceder para alcanzar un fin determinado fin. Por ello, se puede entender metodología como un soporte para los líderes de un proyecto (o equipo de trabajo) que les indique qué actividades deben realizar para alcanzar un objetivo determinado. Una metodología debe contener al menos, un contexto de aplicación, una estrategia (o modelo), herramientas y técnicas; y conceptos y terminologías claras

El modelo de la Figura 52 presenta un marco general para el proceso de experimentación. Toma como punto de partida que se identificó un problema y se busca resolverlo o disminuir su impacto, ayudándose de la experimentación. Dicho modelo describe globalmente las fases que deben realizarse de una manera sencilla.

El modelo en el que se sustenta la metodología consta de 7 fases. Se basa en las etapas de la metodología de mejora Seis Sigma: DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar). La fase hipotética de Analizar del DMAIC fue dividida en tres, incluyendo a grandes rasgos la selección del diseño experimental en la fase Pre-Analizar y el análisis de los datos obtenidos en la fase Experimentar en la fase Analizar.

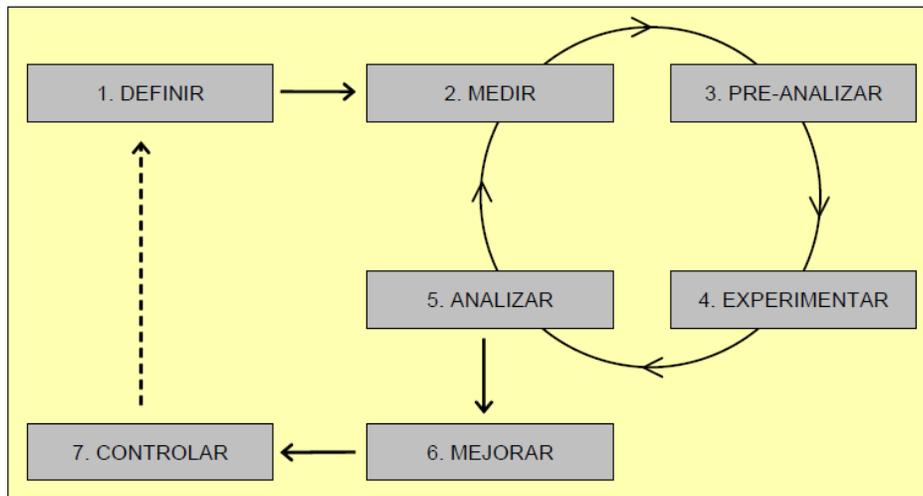


Figura 52 - Metodología diseño de experimentos. La figura muestra los pasos que se realizan durante un diseño de experimentos, los cuales están basados en la metodología Seis Sigma. (Autoría propia 2020)

De manera general, se presentan a continuación una breve descripción de cada una de las fases de la metodología, según Bernal (2012).

- 1. Definir:** Se elige la respuesta y los objetivos que se desean alcanzar.
- 2. Medir:** Se identifican los factores que influyen en la respuesta.
- 3. Pre-Analizar:** Se selecciona el diseño que determina “cómo” se van a realizar los experimentos.
- 4. Experimentar:** Se realizan los experimentos.
- 5. Analizar:** Se analizan los resultados obtenidos de la experimentación.
- 6. Mejorar:** Se realizan recomendaciones y se planifican las mejoras.
- 7. Controlar:** Se intenta asegurarse que las medidas adoptadas permanezcan en el tiempo.

Como se mencionó anteriormente, cada una de las fases del modelo de la metodología, incluye una serie de actividades que deben ser completadas antes de seguir con la siguiente fase. Las actividades que deben realizarse para completar cada una de las fases se presentan a modo de resumen en la Tabla 6.

Tabla 6 - Actividades de experimento

1. Definir	1.1 Seleccionar equipo de trabajo	1.2 Formular problema	1.3 Documentar información relevante	1.4 Elegir respuesta	1.5 Establecer objetivo
2. Medir	2.1 Identificar factores	2.2 Clasificar factores	2.3 Definir estrategias para algunos factores	2.4 Describir conocimiento actual de efectos de los factores	2.5 Determinar rangos y niveles
3. Pre-Analizar	3.1 Caracterizar factores	3.2 Elegir tipo de diseño	3.3 Elegir niveles		
4. Experimentar	4.1 Preparar experimento	4.2 Considerar pruebas piloto	4.3 Realizar experimento y recolectar datos		
5. Analizar	5.1 Calcular efecto de los factores	5.2 Interpretar resultados	5.3 Evaluar necesidad de nuevos experimentos		
6. Mejorar	6.1 Evaluar necesidad de experimentos confirmatorios	6.2 Extraer conclusiones y realizar recomendaciones	6.3 Implementar medidas		
7. Controles	7.1 Implementar controles	7.2 Validar resultados			

3.3.1 Definir

El punto de partida de la metodología es la identificación de un problema (u oportunidad de mejora) que se quiere solucionar o disminuir su impacto con la ayuda de experimentación. Para el caso en que la experimentación no se presente como una solución clara, se recomienda realizar una **fase 0**. En dicha fase se recomienda analizar el proceso en cuestión y determinar si el proceso está relativamente “bajo control”, o sea que, no existen causas puntuales que condicionen la futura experimentación.

En la fase Definir se debe establecer el escenario en el que se desarrollará la experimentación. Para ello se deben realizar las actividades sugeridas en la siguiente tabla 7. Las actividades presentadas son propuestas en el diseño de experimentos, pero son opcionales dependiendo del tipo de problema o la información con que se cuenta.

Tabla 7 - Fase Definir

Actividades	Herramientas
1.1 Seleccionar equipo de trabajo	<p data-bbox="1057 737 1295 772">Diagrama de flujo</p> <p data-bbox="1057 806 1300 842">Mapa de procesos</p>
1.2 Formular problema	
1.3 Documentar información relevante	
1.4 Elegir respuesta	
1.5 Establecer objetivo	

Seleccionar equipo de trabajo

No es recomendable que una sola persona diseñe y realice el experimento. El mejor acercamiento para esta actividad es crear grupos interdisciplinarios en los que participen las distintas personas del área de trabajo o estudio, de esta manera se permite analizar el problema desde puntos de vista diferentes que habitualmente resultan en soluciones más innovadoras y de mejor calidad. Si se desea obtener mejoras al problema en cuestión, es importante que dentro del equipo de trabajo se encuentre alguien que este directamente involucrado en el proceso que se desea mejorar.

Algunas recomendaciones para la formación del equipo de trabajo son:

- Formado por un número de personas entre 3 y 6.
- El dueño del proceso debe ser parte del grupo.
- Debe ser un equipo autogestionado.

Formular problema

La formulación del problema es una parte esencial del diseño de experimentos y consiste en construir enunciados que describan de manera precisa lo que está mal. Es aconsejable que el problema sea cuantificado ya sea por el costo de la mala calidad o el efecto en el producto y de ser posible incluir información gráfica que represente el problema.

“La formulación del problema debe responder preguntas como: ¿Cuál es la oportunidad de mejora o el problema?, ¿Qué es lo que se está haciendo mal?, ¿Cuál es el problema específico que se observa?, ¿Cuál es el impacto del problema?” (Eckes, 2004)

Documentar información relevante

Es recomendable documentar cualquier información que se considere útil y que tenga origen en la experiencia, proyectos previos o de expertos en la materia. De esta manera con la información documentada se puede estimar la variabilidad del proceso en situaciones normales.

En algunos casos, también es de utilidad obtener una visión general del proceso o producto que se va a analizar, por lo que se puede construir un diagrama de flujo o mapa de procesos para explicar gráficamente el proceso a estudiar. Para los casos en

los que fue necesario realizar una fase 0, la mayoría de la información necesaria debió ser recolectada en dicha fase.

Elegir respuesta

Se conoce como respuesta a la variable resultante que se desea medir como resultado de un proceso evaluado, es decir una variable dependiente.

Las respuestas regularmente provienen de la mayoría de las personas involucradas en el proyecto, ya que ellos tienen el conocimiento de lo que se requiere cambiar, por ejemplo, un valor eléctrico, un porcentaje de fallas, una concentración de químicos o que tan eficiente es un proceso. Lo ideal es que la respuesta sea continua, fácil y precisa de medir y por último que este ligada claramente al problema,

En aquellos casos en los cuales es inevitable utilizar una variable discreta (categórica), se debe intentar convertirla en una variable de puntuación, por ejemplo, del 1 al 10, que describa o categorice la condición del problema y evitar así el uso de respuestas de carácter binomial (falla/no falla, bueno/malo). En ocasiones será necesario tener que seleccionar más de una respuesta para poder analizar el problema, esto debido a que muchas veces no es posible medir un proceso con un solo indicador. A pesar de esto, se recomienda utilizar solo respuestas que estén relacionadas directamente con el problema a solucionar, ya que tener un exceso de variables puede llegar a complicar la interpretación de los resultados.

Una vez definida la respuesta(s), estas deben ser descritas claramente, incluyendo la manera en que serán medidas o clasificadas y asegurándose a la vez que la medida será repetible y fiable. Cuando la precisión de la medición es baja, una solución sería medir varias unidades o elementos experimentales y considerar la media de ellas como la respuesta.

Establecer objetivo

Como se mencionó anteriormente, la descripción del problema describe “lo que está mal”, mientras tanto el objetivo define los resultados que se deben obtener para que el proyecto sea considerado como un éxito. Los objetivos deben ser cuantificables, teniendo como características principales ser específicos, medibles, alcanzables, realistas y limitados en el tiempo.

De acuerdo con Gómez (2003), la formulación del objetivo debe incluir los siguientes elementos:

- Descripción de lo que se debe hacer: debe contener un verbo que identifique lo que se quiere lograr en el proyecto, como por ejemplo optimizar, robustecer o comparar. No se refiere al “como se va a realizar”. De igual manera debe hacer referencia a la respuesta que se quiere lograr como Maximizar o Minimizar un valor determinado (desperdicio, tiempo de proceso, cantidad de material utilizado, etc.).
- El objetivo debe ser medible: En lo posible se debe intentar cuantificar los resultados que se busca obtener ya sea con los costos de calidad evitados, o las ganancias obtenidas. De esta manera es como el proyecto se puede vender a los directivos y contar con el apoyo necesario de ellos. Por último, de igual manera es recomendable proveer una estimación de los costos necesarios para completar el proyecto.

3.3.2 Medir

Esta fase inicia con la identificación de las variables que pueden tener influencia en la respuesta y su clasificación. Posteriormente se elige la estrategia a seguir para algunos factores según su clasificación y de ser necesario se validan los sistemas de medición. Por último, se establece el conocimiento que se tiene actualmente sobre el efecto de los factores, para de esta manera determinar el rango de ellos.

En concreto, se busca identificar, clasificar y caracterizar los factores para el experimento. Para ello es recomendable completar las actividades que apliquen de la tabla 8.

Tabla 8 - Fase Medir

Actividades	Herramientas
2.1 Identificar factores	<p data-bbox="1078 627 1273 659">Lluvia de ideas</p> <p data-bbox="993 697 1357 728">Diagrama de causa y efecto</p>
2.2 Clasificar factores	
2.3 Definir estrategias para factores	
2.4 Describir conocimiento actual	
2.5 Determinar rangos y niveles	

Identificar factores

Un factor es una variable que afecta al valor de la respuesta. En esta etapa es de suma importancia enlistar todos los posibles factores para tener en cuenta. Dichos factores pueden ser valores numéricos continuos, como por ejemplo temperatura, velocidad, o discretos (categóricos) como el tipo de acabado de un material, o un proveedor.

Una herramienta recomendada por los promotores de seis sigmas para considerar la mayor cantidad de factores de un problema, es la tormenta de ideas. Estas pueden ser sesiones cortas donde todas las sugerencias del equipo de trabajo respecto al problema de trabajo puedan ser consideradas.

Clasificar Factores

El equipo de trabajo debe ser capaz de clasificar los factores identificados de acuerdo con las siguientes categorías (Bernal, 2012):

- a) Factores primarios: Son aquellos factores cuya influencia en la respuesta o variable dependiente es desconocida y se desea estudiar. Estos factores son los que se evaluarán o tomarán distintos valores dentro del diseño de experimentos y una vez concluido, la modificación de los valores de los factores controlables permitirá obtener las mejoras que se tienen como objetivo.
- b) Factores Constantes: Estos factores son aquellos que podrían tener cierta influencia en la variable de respuesta, pero que para el experimento en cuestión no es necesario investigar o no es relevante su efecto, por lo cual no serán modificados durante el experimento y se mantienen constantes.
- c) Factores molestos: Son aquellos factores cuyo efecto en la respuesta no se desea estudiar. Esto incluye a los factores que se espera no influyan en la respuesta, o aquellos que es prácticamente imposible modificar su valor durante el experimento.

Según Bernal (2012), es difícil en ocasiones decidir por la clasificación idónea, ya que muchos factores primarios aumentan el costo y el esfuerzo requerido para el experimento, demasiados factores mantenidos constantes limitan las posibles soluciones de donde pueden ser extraídas conclusiones y muchos factores molestos pueden provocar que exista variabilidad en la respuesta, de esta manera evitando distinguir el efecto de algunas variables.

Por lo tanto, es recomendable tener la mayor cantidad de factores primarios ya que no incluir una variable importante puede provocar que el experimento arroje resultados erróneos.

Definir estrategias para algunos factores

Los factores primarios y los molestos pueden ser clasificados en las siguientes categorías: Controlables y No controlables. En resumen, que un factor sea controlable significa que se puede elegir el valor en que se fija dicho factor. En el caso de los factores primarios, la clasificación se refiere únicamente a sí son controlables únicamente para propósitos de la experimentación o sí son siempre controlables durante un proceso normal. Aquellos que son controlables siempre se llaman factores de control y aquellos que son sólo controlables para la experimentación se llaman “factores ruido”. La presencia de factores ruido obliga generalmente al uso de diseños especiales conocidos como Diseño Robusto de parámetros. Estos diseños intentan encontrar el nivel de los factores controlables que minimizan la variabilidad causada por los factores ruido

Según Bernal (2012), la manera en que es categorizado cada factor molesto nos ayuda a determinar la estrategia que será necesaria usar para estos factores durante la experimentación.

- Controlables: Son aquellos factores cuyo valor se puede fijar de acuerdo con niveles deseados. Cuando se prevé que dichos factores pudieran tener influencia en la respuesta, la estrategia seleccionada se denomina bloqueo. Se denomina bloque a las condiciones del experimento en las cuales se espera que la respuesta sea más homogénea comparadas con las otras condiciones del experimento. Ejemplos de bloques puede ser un lote de producción o el día en que se realiza el experimento.
- No controlables: Son aquellos factores que es imposible controlar por alguna razón (Ambiental o económica, por ejemplo). A pesar de esto, muchas veces es posible medirlos. Un ejemplo de esto es la humedad o la temperatura ambiente.

Cuando se cree que el efecto de estos no será significativo, la aleatorización de los experimentos permitirá protegerse en cierta medida del efecto de estos factores en la respuesta.

La figura 53 representa gráficamente un árbol de decisiones para las actividades previamente mencionadas respecto a los factores.

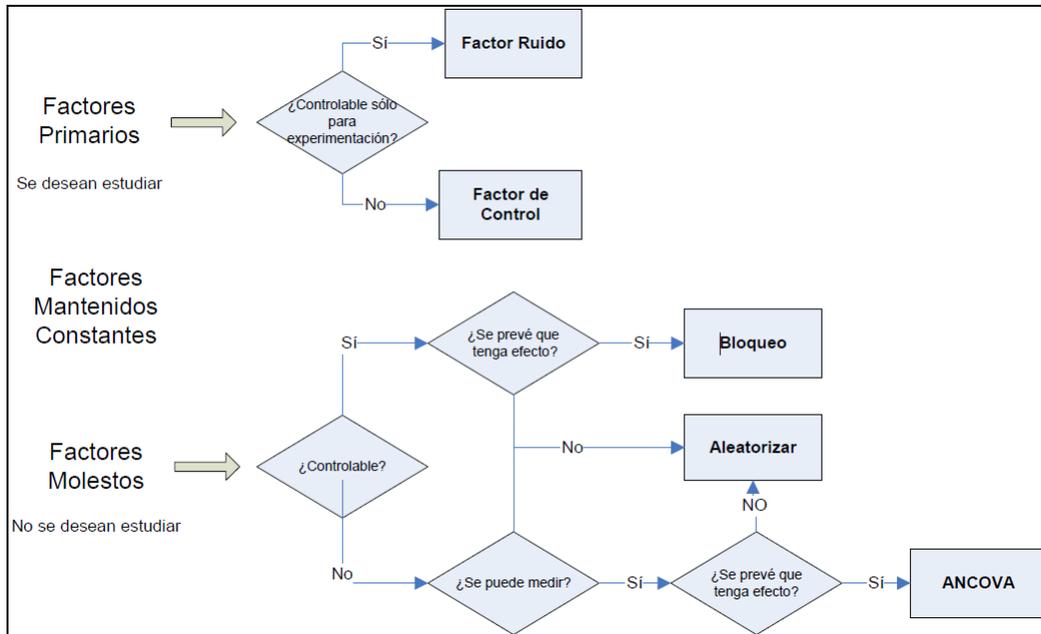


Figura 53 - árbol de decisiones. La figura muestra las condiciones a considerar para clasificar los factores utilizados en un experimento. (Autoría propia 2020)

Validar sistemas de medida

Una vez que se han clasificado los factores es importante establecer los procedimientos para la correcta medición de los factores primarios cuantitativos, así como definir su precisión. El establecerlos sistemas de medida y definir como serán medidos los factores es un aspecto clave en un experimento.

Una medición ineficiente puede representar un impacto en los resultados, ya que conlleva una decisión incorrecta dada la mala información. Para cada factor primario se recomienda analizar la respuesta a preguntas cómo ¿Que se va a medir?

¿Qué precisión requiere? ¿Existe procedimiento sobre lo que se requiere medir y ¿cómo hacerlo?

Describir conocimiento actual de los efectos de los factores

A pesar de que, en la mayoría de los casos industriales, no se posee mucha información sobre el efecto (influencia) de los factores sobre la respuesta. Las siguientes preguntas pueden ayudar: ¿Se obtiene una respuesta más alta cuando se aumenta el factor? ¿O por el contrario decrece la respuesta? ¿Se alcanza un límite? ¿Hay curvatura significativa? (Figura 54). Identificar estas propiedades ayuda a elegir un diseño y niveles más adecuado.

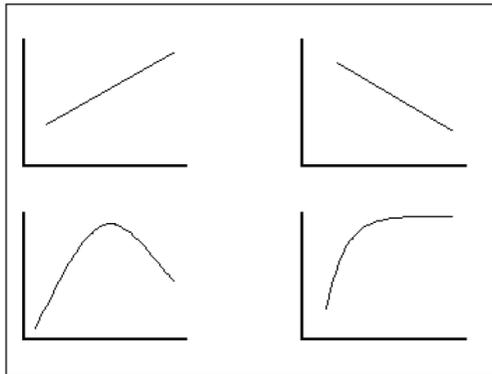


Figura 54 - Efecto de los factores. La figura muestra gráficamente los efectos de los factores sobre la respuesta en un experimento (Autoría propia 2020)

De igual manera, es importante también intentar describir las posibles interacciones entre los factores. Se dice que dos factores tienen interacción cuando el efecto de uno de ellos en la respuesta depende del nivel en el que se encuentra el otro (Bernal, 2012). Este efecto a veces no es sencillo de comprender, por lo que se recomienda representarlo gráficamente. Por ejemplo, la figura 55 muestra una gráfica de interacción entre dos factores Potencia (A) y Corriente (B). En ella se muestra como el efecto de la potencia depende del nivel en que está la corriente, ya que si la corriente está en (-1) al aumentar la potencia disminuye la potencia. Lo contrario sucede cuando la corriente se fija en (+1).

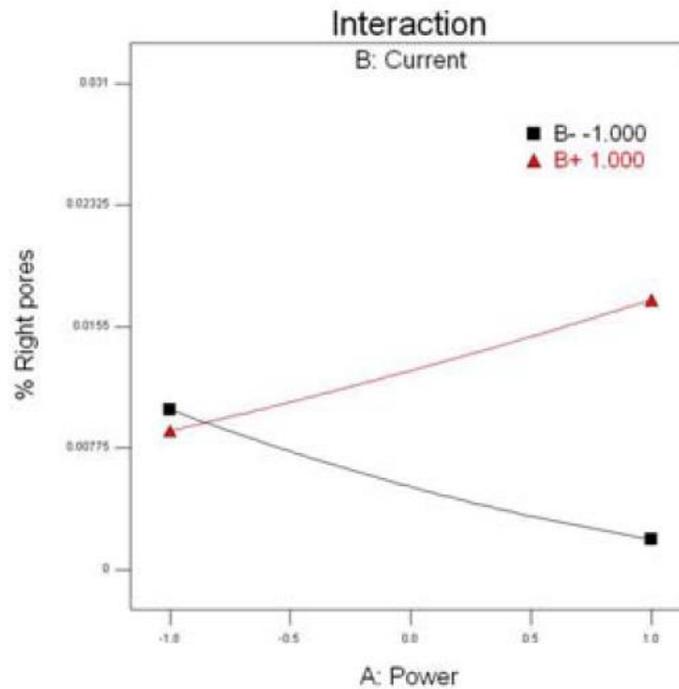


Figura 55 - Interacción entre dos factores. La figura muestra gráficamente la representación de la interacción de dos factores en u experimento. (Autoría propia 2020)

Determinar rangos y niveles

Se denomina niveles de un factor, a los diferentes valores del factor con los cuales se realizará el experimento. Los niveles de cada uno de los factores suelen estar determinados por las restricciones impuestas ya sea por el mismo proceso o por el mismo propósito del diseño de experimento. En ciertas ocasiones los niveles ya están predeterminados y no será posible modificarlos, mientras que en otras ocasiones serán opcionales y se necesitara evaluar entre el esfuerzo necesario para el experimento (tiempo, costo, etc.) y la información que se requiere obtener de él. A este nivel del experimento, a veces no será aun posible determinar los niveles de todos los factores primarios, pero se deberá especificar por lo menos el número de niveles con los cuales será posible experimentar las variables cualitativas y el rango de interés de cada uno de los factores cuantitativos.

La metodología del diseño de experimentos (DOE) distingue entre tres principales tipos de rango según Bernal (2012):

- Rango de operación: Espacio donde se pueden realizar experimentos teóricamente.
- Rango de interés: Incluido en el rango de operación, es la región que el experimentador desea analizar.
- Rango de experimentación. Incluido en el rango de interés, queda definido por el diseño cuando son establecidos los niveles a experimentar.

El rango debe ser suficientemente amplio para que incluya toda la zona que se desea estudiar, aunque se debe evitar incluir en el rango de un factor, valores de los cuales sabemos previamente que la respuesta obtenida será mala.

3.3.3 Pre- Analizar

La elección del diseño experimental es una actividad crítica en la aplicación del diseño de experimentos, una selección incorrecta comprometerá los resultados del experimento.

La mayoría de los programas computacionales o software (para propósito de esta investigación, Minitab 18) contiene diferentes plantillas para diseños de experimentos. En ocasiones es difícil identificar el tipo de diseño que mejor se adecue a nuestras necesidades y el objetivo de la experimentación. En este capítulo se describen las pautas para determinar adecuadamente la cantidad de experimentos a realizar, las condiciones para cada experimento y el orden en que se recomienda realizarlos. A continuación, se muestra la tabla 9, la cual contiene las actividades implicadas en la selección del diseño de experimentos

Tabla 9 - Fase Pre-analizar

Actividades	Herramientas
3.1 Caracterizar factores	Aleatorización
3.2 Elegir tipo de diseño	Análisis por software (Minitab)
3.3 Elegir niveles	Representación grafica

Caracterizar factores

En el diseño de experimentos, la elección del diseño tendrá el principal impacto en los resultados, por lo que se debe buscar que el diseño se ajuste a nuestras necesidades, en el sentido de que nos permita estudiar y analizar de la mejor manera el efecto de los factores seleccionados y considerados como importantes. Para esto es necesario considerar todo aquello que pueda influir en esta elección.

Primero se caracterizan los factores, listando algunas características de los factores mismos. En la elección del diseño influyen las cantidades de factores primarios y de niveles para los factores cualitativos. Influye también el tipo de región del diseño formado por los valores que pudieran tomar los factores involucrados en el diseño.

Es importante detectar también si existen restricciones en los factores que nos obliguen a realizar diseños especiales. Una restricción sería cuando los factores son componentes o materiales de una mezcla, por lo que sus niveles no son entre si independientes. Por ejemplo, los aditivos de gasolina en relación con lo kilómetros recorridos por el un coche, o las fracciones de metales que forman una aleación con relación a su resistencia mecánica.

En otros casos, existen muchas restricciones en la región de los factores debido a que hay demasiadas combinaciones que no son viables. En estos casos, los diseños clásicos pueden no ser adecuados y sería necesario recurrir a diseños específicos generados por el software.

Elegir tipo de diseño

Utilizar un software de estadística, como en este caso Minitab 18, para la construcción y análisis de los diseños otorga ventajas, ya que permite ahorrar tiempo al no ser necesario ahondar en cuando a aspectos teóricos para elaborar los diseños. Esto no exime al experimentador de interpretar y decidir o que el software elabora como respuesta.

Los diseños más comunes y recurridos están incluidos en minitab 18 y son suficientes para cubrir la necesidad de un experimento. Los diseños más utilizados usualmente, donde K es el número de factores del experimento, se presentan a continuación. Elaborar detalles sobre cada uno de ellos requiere de mostrar una gran cantidad de información, por lo cual se presentan de manera general.

a) **Factoriales Completos:** Este tipo de diseño incluye todas las combinaciones posibles entre los niveles de cada factor. Por lo tanto, el número de experimentos necesarios es el producto de la cantidad de niveles de cada uno. Los diseños con factores a dos niveles (2^k) son muy utilizados en la industria, ya que son muy eficientes y permiten la estimación de todos los efectos.

b) **Factoriales fraccionados:** Para factores a dos niveles, el número de experimentos requeridos para un factorial completo puede ser alto. Para reducir el número de experimentos, es posible seleccionar una fracción, como una mitad o un cuarto, de un factorial completo. Un 2^{k-p} factorial fraccionado es un diseño que selecciona una fracción $1/2^p$ del 2^k . Estos diseños poseen la desventaja de tener efectos confundidos, lo que dificulta la interpretación de los resultados.

Para la elección del tipo de diseño experimental es importante analizar cuatro aspectos importantes como el propósito del experimento, los recursos y el presupuesto, así como la información previa (Bernal, 2012).

La realización de un experimento implica la necesidad de recursos humanos y materiales. Además, es recomendable establecer la cantidad máxima de experimentos que se puede llegar a realizar. Con esto se obtiene una relación de costo beneficio en cuanto al costo de la propia experimentación contra la información que se busca obtener. Un experimento costoso del cual la información o respuesta obtenida no tendrá un impacto económico considerable no será fácil de justificar. En cuanto a la información previa, las técnicas estadísticas implicadas en un diseño de experimentos son más efectivas cuando son combinadas con los conocimientos previos que se tienen sobre un proceso o problema. Se recomienda tener en el experimento un número bajo de niveles, por lo general dos niveles para cada factor son suficientes para obtener una respuesta robusta.

El grado de complejidad entre los factores y la respuesta es fundamental para la elección del tipo de diseño.

Seleccionar Diseño experimental

La teoría menciona que para elegir de la mejor manera el diseño que se va a experimentar se recomienda analizar tres aspectos:

- Elegir tamaño de muestra
- Intentar aleatorizar los experimentos
- Utilizar información previa

Elegir tamaño de muestra: La cantidad de experimentos a realizar debe estar condicionado por la predicción entre la relación señal/ruido, es decir el valor del efecto que se espera detectar teniendo en cuenta la variabilidad del proceso.

Para diseños factoriales completos, uno de los métodos más comunes para conseguir un potencial alto es mediante la replicación de los experimentos. Por réplica se entiende una repetición independiente de cada una de las combinaciones experimentales. No se debe confundir replicación con medidas repetidas

En la industria muchas veces no es posible realizar un gran número de experimentos. Es por ello, que al intentar analizar experimentaciones con pocos experimentos se tiene como resultados una reducción en la precisión y en la claridad del efecto que provocan los factores estimados en la respuesta. El diseño de experimentos intenta solucionarlo, reduciendo los experimentos de manera controlada provocando que, por ejemplo, el resultado de un factor que podría ser potencialmente importante se mezcle con el efecto de una interacción poco probable.

Aleatorizar experimentos: Una vez que el software ha construido el diseño, es importante realizarlos en orden aleatorio. En ocasiones aleatorizar todos los experimentos no es posible ya que se tienen factores difíciles o que implican un costo muy alto al modificar niveles. En esos casos se puede elegir un diseño que reduzca el número de veces que se deben cambiar los niveles de estos factores, lo cual implicaría que no se realice de forma completamente aleatoria.

Utilizar información previa: La información previamente disponible recolectada en etapas anteriores, además de ser útil para elegir el tipo de diseño, es útil también para asignar los factores. Ubicar correctamente los factores de acuerdo con los efectos esperados como significativos puede ser importante. Si por ejemplo se espera que alguna interacción sea importante, se debe elegir confundirla con otras que no se esperen importantes y observar el resultado.

Elegir Niveles

Al elegir el diseño se presupone la cantidad de niveles para cada uno de los factores cuantitativos involucrados, por lo que esta actividad consiste en determinar el valor de los niveles en los cuales serán experimentados los factores elegidos. Dichos niveles deben pertenecer al rango de valores previamente seleccionados en la fase 2.

En teoría se recomienda que los niveles bajo/alto deban ser seleccionados de tal forma que el efecto previsto en la respuesta sea de una desviación estándar de la respuesta.

En la práctica los niveles son determinados por la experiencia, intentando siempre elegir dos valores lo suficientemente distantes de tal manera que existan diferencias en la respuesta observada, aunque lo suficientemente cerca para que en el rango de valores de ellos se obtengan respuestas aceptables y que al mismo tiempo no se viole el supuesto de linealidad.

Una vez se ha elegido el diseño, se debe determinar cómo se analizarán los experimentos. Se recomienda elaborar una matriz para mostrar la manera en la cual se llevarán a cabo los experimentos, los niveles de cada uno de los factores para cada experimento, el orden de estos y la asignación de bloques (si son necesarios). Para diseños con pocos factores es posible representarlo gráficamente para facilitar la comprensión de este.

3.3.4 Experimentar

En la etapa de experimentación es donde se realiza el experimento como tal. Sin embargo, es importante considerar algunas actividades previas. La siguiente tabla muestra algunos puntos a verificar antes de poner en práctica el experimento:

Tabla 10 - Fase Experimental

Actividades	Herramientas
4.1 Preparar experimento	Hoja de recolección de datos
4.2 Considerar pruebas piloto	Diseño de experimentos
4.3 Realizar experimento y recolectar datos	Pruebas piloto

Preparar experimentos

Antes de elaborar el experimento se debe asegurar que todos los recursos necesarios para la elaboración de este estén disponibles. De igual manera tratar de anticiparse a posibles eventualidades que pudieran presentarse. Para asegurar el mejor desempeño del ejercicio de experimentación es recomendable asegurarse de seleccionar la ubicación adecuada, verificar la disponibilidad del equipo máquinas y operadores. Preparar las hojas de recolección de datos, así como informar al equipo sobre las instrucciones necesarias para realizar el experimento cuando sea necesario.

Necesidad de pruebas piloto

Con el fin de evitar el desperdicio de recursos, se sugiere que previo a iniciar con los experimentos elegidos se realicen, de ser posible, algunas pruebas piloto. Esto con la finalidad de obtener información acerca del comportamiento del material utilizado y verificar los sistemas de medición. El ejercicio de experimentación implica tener personas participando en una actividad que no es común para ellos con actividades que anteriormente no habían realizado, por lo tanto, las pruebas piloto pueden ser útiles como practica para todos los involucrados.

Realizar experimento y recolectar datos

Una vez realizadas las actividades anteriores, se procede a realizar el experimento y la consecuente recolección de datos. Esta actividad pudiera parecer sencilla, pero es necesario tener cuidado para que el experimento y la recolección de datos sean llevados de manera adecuada. Siguiendo el plan de diseño previamente definido.

El organizador del experimento en lo posible debe dar seguimiento presencialmente al experimento para tomar nota de cualquier evento que pudiera considerarse importante.

3.3.5 Analizar

Esta fase implica utilizar las herramientas estadísticas para el análisis de los datos obtenidos en el experimento. Si el diseño fue elegido correctamente y los experimentos fueron realizados de acuerdo con lo previsto, la estadística para analizarlo no será compleja. Analizar los datos es un proceso continuo en el cual a medida que se avanza en el análisis, se aplique el conocimiento en nuevos análisis.

De acuerdo con Bernal (2012), dependiendo del propósito del experimento, no todas las actividades de esta fase deben ser completadas, dependiendo esto a la necesidad del experimento.

La fase de análisis implica la realización de las actividades de la tabla 11:

Tabla 11 - Fase Analizar

Actividades	Herramientas
5.1 Calcular efecto de los factores	Gráficos de Pareto
5.2 Interpretar resultados	Gráficos de relación
5.3 Evaluar necesidad de nuevos experimentos	

Calcular efecto de los factores

Antes de iniciar con el análisis formal, se recomienda observar los datos de respuesta y detectar si se observa algo inusual. Algunos autores recomiendan analizar el experimento que haya dado mejores resultados (Elegir el mejor) y utilizarlo como guía para el resto del análisis.

El efecto de un factor representa la variación de la respuesta causado por el cambio únicamente de un factor desde su nivel bajo (-) hasta su nivel alto (+). Si el signo del efecto es positivo, significa que el cambio del nivel bajo al alto produce un incremento en la respuesta.

Minitab 18 puede realizar los cálculos de los efectos. Se recomienda además la elaboración y presentación de Diagramas de Pareto de los efectos. Por ejemplo, la figura 56 muestra la magnitud de todos los efectos que es posible calcular y al mismo tiempo una línea que indica cuales efectos son estadísticamente significativos.

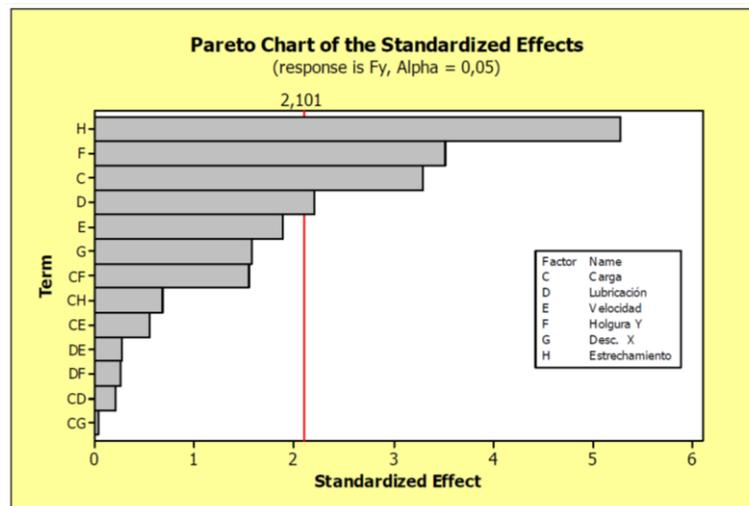


Figura 56 - Diagrama de Pareto de efectos. La figura muestra gráficamente la representación de la magnitud de todos los efectos posibles en un experimento. (Autoría propia 2020)

Interpretar resultados

Una vez que los efectos han sido detectados, es importante intentar interpretar estos resultados físicamente. Una interpretación correcta nos permite obtener mejores conclusiones que las arrojadas por el propio análisis. Para este propósito el software estadístico nos otorga opciones para utilizar varios gráficos, como los gráficos de efectos (Main effect plot) y los gráficos de interacciones (Interaction plot). Estos gráficos expresan la mayoría de la información que se puede obtener de un experimento que ha sido seleccionado correctamente.

Evaluar necesidad de experimentos adicionales

Una vez completadas las actividades adecuadas para cada objetivo de un experimento se sugiere analizar la necesidad de realizar nuevos experimentos.

De acuerdo con Bernal (2010):

- Pueden existir diferentes razones por las cuales es necesario realizar experimentos adicionales, pero la principal está relacionada con la confusión de los efectos en el experimento, esto debido a una baja resolución del diseño elegido, ya que no permite descifrar cuales son las interacciones realmente importantes, por lo cual se considera realizar experimentos adicionales para calcular claramente dichos efectos.

3.3.6 Mejorar

Las actividades de todas las fases anteriores, debe reflejarse en resultados que puedan ser implementados en esta fase de mejora. Para esta fase se proponen las actividades presentadas en la tabla 12

Tabla 12 - Fase Mejorar

Actividades	Herramientas
6.1 Evaluar experimentos confirmatorios	Diseño de experimentos
6.2 Extraer conclusiones y recomendaciones	
6.3 Implementar medidas	

Evaluar necesidad de experimentos confirmatorios

Profesionales de la mejora continua y la calidad, recomiendan realizar experimentos confirmatorios para asegurarnos de las mejoras obtenidas antes de realizar los cambios considerados como definitivos. Un experimento confirmatorio consiste en una mínima cantidad de pruebas, una recolección pasiva de datos o como máximo realizar otro diseño de experimentos con una variación de los factores en $\pm 10\%$ a lo largo del valor óptimo con el propósito de estudiar la sensibilidad de la respuesta.

Es importante enfatizar que, si se obtiene una mejor respuesta al realizar un experimento confirmatorio, no necesariamente estas respuestas serán viables económica o técnicamente. Para ello se recomienda realizar sobre experimentos comparativos y analizar los resultados comparándolos contra la situación actual o de partida contra la propuesta de mejora.

Extraer conclusiones y recomendaciones

Una vez que el experimento es analizado, se deben extraer conclusiones y realizar recomendaciones prácticas. Muchas veces la identificación y comprensión de las causas del problema no proveen automáticamente la solución al problema o la acción correctiva necesaria.

Una vez que el grupo ha llegado a una conclusión sobre una solución, deberá convocarse a una reunión dedicada a presentar los resultados. Es recomendable que en estas reuniones se encuentren presentes participantes de todos los grupos de trabajo y niveles de operación. Al presentar los resultados, es recomendable hacerlo de manera gráfica y evitar los detalles técnicos que pudieran generar confusiones hacia los participantes.

Implementar medidas

Los directivos de la empresa o negocio son los responsables de decidir en base a la información presentada, cuales recomendaciones sugeridas en base a los resultados, deberán llevarse a cabo. Una vez que se decide cuáles serán las recomendaciones ejecutadas, se debe elegir la persona encargada de que dicha acción se lleve a cabo y de los plazos para realizarlo. La tarea de implementar las medidas recomendadas puede no ser una tarea fácil, debido a que cualquier cambio técnico regularmente vira acompañado de una Resistencia al cambio, por lo cual en ocasiones puede ser incluso necesario formar nuevos equipos de trabajo para llevar a cabo la implementación.

3.3.7 Controlar

Al implementar las mejoras en la fase anterior, se debe dar continuidad al proyecto por medio de la etapa de control. Esta fase nos ayuda a realizar el seguimiento y verificar la estabilidad de las mejoras obtenidas. En esta fase se recomienda realizar las actividades presentadas en la tabla 13 presentada a continuación:

Tabla 13 - Fase Controlar

Actividades	Herramientas
7.1 Implementar controles	Procedimientos
7.2 Validar resultados	Plan de control

Implementar controles

Es de suma importancia que las mejoras implementadas sean también documentadas, ya sea mediante los procedimientos que se encuentren disponibles o en algún otro documento que incluso deba ser generado, para de esta manera las mejoras sean adoptadas como parte del proceso. Regularmente como parte de la actividad de control se actualiza o genera un plan de control de proceso, de tal manera que se asegure que los controles o las medidas recién adoptadas en el proceso sean realizadas adecuadamente por el equipo.

El objetivo de dichos controles es simplemente intentar controlar que las mejoras obtenidas en el proceso se mantengan a través del tiempo. De no ser así, se corre el riesgo de que el problema recién resuelto vuelva a presentarse en el corto plazo.

Validar resultados

¿Una vez se hayan implementado los controles y el proceso fluya con normalidad, es recomendable hacer una revisión del proyecto en general buscando respuestas a preguntas cómo? ¿Que se hizo bien? ¿Y qué se puede hacer mejor? El objetivo de esta revisión es aprender para futuros proyectos, analizando cuestiones de la gestión de este como si se cumplió con los plazos y objetivos previstos, se cumplieron los presupuestos, y por último si se justificó la inversión tanto en dinero como en tiempo.

3.4 Realización de experimento

Una vez que la metodología ha sido presentada, el presente proyecto intenta validar dicha metodología por medio del caso práctico que es objeto de estudio. En esta investigación se incluye información sobre la situación actual respecto al problema de soldabilidad en la empresa Victoreen de México (Ohmite) así como el desarrollo de la metodología de diseño de experimentos propuesta para tratar de encontrar una solución a la problemática planteada.

Se presenta de manera resumida los datos recolectados antes de la elaboración del experimento, buscando mostrar la situación que origina la necesidad de encontrar una mejora en el proceso de manufactura de resistencias, enfocada específicamente a la mejora en la característica de soldabilidad.

Después, se presentará información referente al experimento propuesto para buscar la solución al problema de soldabilidad. Esta información será presentada también de a manera de resumen mostrando la información relevante en relación con el ejercicio del experimento.

Finalmente, se incluyen los resultados contra los cuales se mostrará la situación antes y después del diseño de experimento para de esta manera validar el efecto de las variables independientes (factores) contra las variables dependientes (respuestas).

3.4.1 Recolección de datos y situación antes de experimentación

El siguiente ejercicio fue realizado en la empresa Victoreen de México (Ohmite), se eligió un problema que afectaba a un producto que se encontraba en las fases iniciales de producción el cual corresponde a la resistencia PN:68156-4K7JE. Este problema inicialmente se presentaba de manera intermitente, causando una gran cantidad de desperdicio de entre el 80 y 100 % del material producido. El proceso utilizado en el número de parte mencionado es muy similar a otros productos que se elaboran en la planta por medio de la tecnología de impresión o películas gruesas. Sin embargo, presenta una característica que nunca se había utilizado en otros productos, la cual consiste en aplicar capas dobles en la impresión del conductor.

El problema por estudiar está relacionado con una prueba de soldabilidad que se realiza al producto como parte de la validación de este. Esta prueba es realizada en base a una muestra previamente definida de acuerdo con el cliente y la empresa. Debido a que es una prueba destructiva y al costo que implica desechar componentes para poder realizarla, se acordó que la prueba se hiciera considerando 10 muestras por cada lote producido, donde los lotes pueden variar desde 500 hasta 2000 piezas dependiendo de la orden del cliente.

Aun cuando la empresa cuenta con personal de experiencia en el proceso de impresión de películas gruesas, se desconocían los efectos de aplicar dobles capas de impresión de conductor. Debido a esto, la falla de soldabilidad se presentó de manera frecuente en las ordenes iniciales, hacienda necesaria la investigación sobre la causa de este problema. La condición de mala soldabilidad podía ser detectada antes de realizar la prueba misma, ya que la superficie del conductor impreso y curado presentaba una superficie irregular y porosa. Debido a esto, muchas veces los elementos eran retrabajados para poder reducir el riesgo de que los elementos fallaran posteriormente la prueba de soldabilidad.

El interés por parte del departamento de ingeniería y la empresa por resolver este problema, era muy grande ya que, si una prueba de soldabilidad fallaba, prácticamente se tenía que retrabajar toda la orden (500 a 2000 piezas) y aun así en ocasiones el 100% de la orden tenía que ser desechada ya que el retrabajo no garantizaba que las piezas fueran aceptadas en dicha prueba de soldabilidad.

La tabla 14 muestra una relación de los principales defectos para dos órdenes construidas durante el año 2018, en las cuales entre otros defectos se presentó con mayor frecuencia el problema de soldabilidad. Estas órdenes son las más recientes antes de iniciar con la investigación sobre el problema de soldabilidad. Cabe recalcar que, cuando una muestra de soldabilidad de la orden en proceso es rechazada, de acuerdo con el procedimiento de calidad, la orden es rechazada por completo. Sin oportunidad de que se pueda volver a realizar o recuperar material de esta.

Tabla 14 - Relación defectos antes experimento

Orden# MO590810		Defectos en inspección visual	
Cantidad de la orden= 1000 piezas			
Defectos		Cantidad	
Impresión desalineada	14	14	
Conductor faltante	12	12	
Mal corte	8	8	
Elemento quebrado	21	21	
Dieléctrico desprendido	19	19	
Contaminación	18	18	
Estampado ilegible	15	15	
Valor resistivo alto/bajo	22	22	
Prueba Soldabilidad	10	10	
Defectos inspección		129	
Total de desperdicio		1000	
Rendimiento		0.00	
Orden# MO600740		Defectos en inspección visual	
Cantidad de la orden= 1000 piezas			

Defectos		Cantidad
Impresión desalineada	18	18
Conductor faltante	11	11
Mal corte	6	6
Elemento quebrado	12	12
Dieléctrico desprendido	6	6
Contaminación	15	15
Estampado ilegible	8	8
Valor resistivo alto/bajo	15	15
Prueba Soldabilidad	10	10
Defectos inspección		91
Total de desperdicio		1000
Rendimiento		0.00

En la figura 57 se muestran ejemplos de la condición de piezas que se considera con mala soldabilidad o prueba de soldabilidad rechazada.

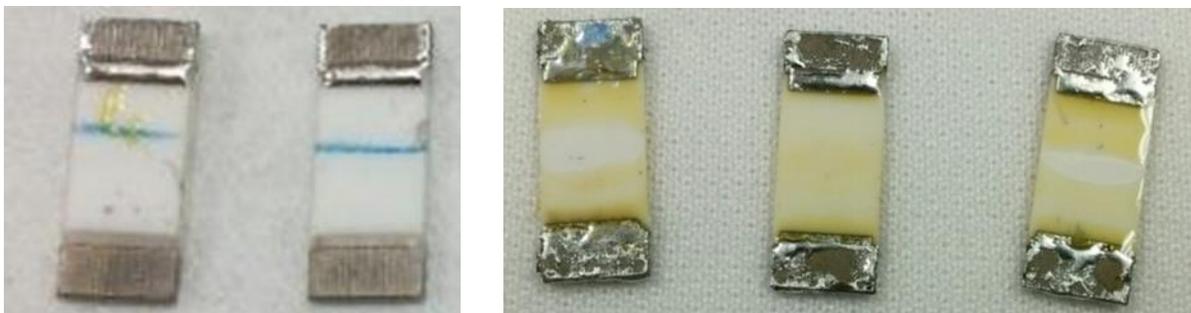


Figura 57 - Ejemplo mala soldabilidad. La figura muestra imágenes de piezas que fueron sometidas y rechazadas durante la prueba de soldabilidad. Se observan bordes o áreas irregulares cubiertas de soldadura. (Autoría Propia, 2020)

3.4.2 Definir

Seleccionar equipo de trabajo

Para llevar a cabo el ejercicio de experimentación, se definió un equipo multidisciplinario que estuviera relacionado directa o indirectamente en el proceso de manufactura de número de parte 68156-4K7JE. Dicho grupo de trabajo estuvo conformado por 4 personas, además del líder del proyecto. La figura 58 muestra el equipo de trabajo que participó en el proceso de experimentación.

El equipo incluye personal de diferentes departamentos, todos ellos habiendo colaborado durante la manufactura del producto Physio 68156-4K7JE.

Nombre	Puesto	Area
Lider: Ivan Gonzalez Morales	Ing. de Lanzamientos	Ingenieria
Dueño del proceso: Victor Martinez	Ing. de Producto	Ingenieria
Dario Garcia	Ing. de Calidad	Calidad
Jose Martinez	Ing. de Procesos	Ingenieria
Manuela Molina	Ing. Industrial	Industrial

Figura 58 - Equipo de trabajo. La figura muestra el equipo de trabajo para el proyecto de resolución de problema de soldabilidad en el producto Physio 68156-4K7JE (Autoría Propia, 2020)

Formulación de problema

La presente aplicación del diseño de experimentos fue realizada para mejorar un proceso de impresión, el cual permitiera como resultado que los elementos fabricados fueran aceptados durante la prueba de soldabilidad.

El proceso bajo estudio es el que se encarga primeramente de realizar las impresiones de tinta en sus diferentes etapas sobre un sustrato de cerámica. Dicho proceso implica depositar tinta conductora y resistiva sobre el sustrato de cerámica. Para propósitos de esta investigación, y considerando que el defecto se origina en la

capa conductora, la investigación se centrara en especial en la impresión de las capas donde interviene la pasta/tinta de conductor.

El problema de soldabilidad puede ser detectado sin necesidad de completar todas las impresiones del producto. La impresión de las capas conductoras involucra imprimir dos capas con la tinta conductora número de parte D99I200.

Primero se imprime la primer capa de conductor sobre ambos lados del substrato y se envía a través del horno para que el material conductor sea curado, después se imprime una segunda capa del mismo conductor, pero solo por la parte trasera del substrato y nuevamente se envía al horno de curado.

Una vez que se han completado ambas impresiones, el material puede ser enviado a laboratorio para realizar la prueba de soldabilidad. En las primeras ordenes, cuando el material era enviado a esta prueba, la prueba de soldabilidad era rechazada y todo el material de la orden era desechado ya que no había manera de asegurar que las demás piezas de la orden pudieran cumplir con una soldabilidad aceptable, de igual manera no era viable someter todas las piezas de la orden a prueba ya que se considera una prueba destructiva por lo tanto el material ya no puede ser considerado para enviar al cliente (ver figura 59).



Figura 59 - Elementos rechazados. La figura muestra un grupo de 5 piezas rechazadas por defecto de soldabilidad después de la prueba de laboratorio (Autoría Propia, 2020)

Este defecto representa los siguientes problemas tanto para Victoreen de México como para el cliente:

- Desperdicio: Una orden de la cual la muestra para prueba de soldabilidad es rechazada no puede ser retrabajada y todo el material de la orden es desechado.
- Queja de cliente: El cliente al ensamblar la Resistencia 68156-4K7JE en su producto, podría observar que no se sueldan bien en su aplicación.
- Fallas de campo: Si algún elemento con mala soldabilidad no es detectado por el cliente y es ensamblado y enviado al cliente final, el producto puede tener fallas de campo, es decir, puede presentar fallas por intermitencia o desprendimiento una vez que se encuentre en uso.

En definitiva, el problema formulado fue: “El nivel de rechazo de piezas en prueba de soldabilidad es superior al permitido, alcanzando rechazos del 100% en las dos últimas ordenes fabricadas en el año 2018. El desconocimiento de la influencia de los parámetros de impresión y curado que afectan al proceso evita que se realicen mejoras en el mismo.

La estimación del costo de calidad de este defecto, considerando únicamente las piezas rechazadas de todas las ordenes fabricadas durante el año 2018, asciende aproximadamente a \$35000 dólares.

Es importante considerar que, las órdenes del año 2018 fueron únicamente órdenes del cliente para evaluación, por lo cual la cantidad pareciera no ser muy alta. Pero de no obtener una solución al problema de soldabilidad y considerando la cantidad de piezas estimadas por año, el costo de calidad podría incrementarse hasta los \$150,000 dólares por año.

Información relevante

Como parte de la información relevante del proyecto, se incluye como anexo del proyecto los siguientes documentos:

- 1- Dibujo del producto (Anexo 1)
- 2- Diagrama de flujo del proceso de resistencia 68156 (Anexo 3)

Ambos documentos corresponden al proceso vigente al momento de realizar la experimentación.

Elegir respuesta

Las respuestas elegidas será el “Porcentaje de área cubierta por la soldadura en prueba de soldabilidad”. Para propósitos del ejercicio en Minitab 18, la respuesta será identificada como “Soldabilidad”

Dichos indicadores serán obtenidos en base al estándar J-STD-002D “Prueba de Soldabilidad para Terminales de Componentes, Terminales y Alambres” (octubre del 2011), de acuerdo con el apartado “Prueba B1” (Test B1), “Evaluación para área de soldabilidad en componentes pasivos. Prueba B1” (Anexo 4)

Dado que la característica de soldabilidad es una variable cualitativa, esta será determinada en base al estándar mencionado en el párrafo anterior, por medio de una correlación entre el criterio de aceptación y el requerimiento por dibujo.

El dibujo del número de parte 68156-4K7JE menciona que la prueba de soldabilidad debe cumplir con un área cubierta de por lo menos el 80% de cada uno de los espacios de contacto del elemento (ver anexo 1, página 2 de 3). En las dos últimas órdenes y de acuerdo con las pruebas de soldabilidad correspondientes, esta condición no se cumplía ya que las piezas estaban por debajo del 80% mínimo requerido.

De acuerdo con la figura 60, la cual muestra los criterios de aceptación de soldabilidad para componentes pasivos (en este caso una resistencia) de acuerdo con el J-STD-002D, se acordó con el equipo una relación de porcentaje de defectos a manera de estandarizar los criterios de evaluación para la condición de soldabilidad en las áreas de conductor del número de parte 68156-4K7JE.

El máximo de porcentaje de defectos o área sin soldadura en el conductor de cada uno de los elementos sometidos a la prueba de soldabilidad no debería exceder el 20% del área, es decir, debería tener por lo menos un área cubierta por soldadura del 80% después de haber realizado la prueba de soldabilidad.

Para propósitos del estudio y de acuerdo con el mismo criterio mostrado en la imagen, un elemento con un área de defectos del 1 a 10% es considerado como ideal, Un elemento con un área de defectos del 10 al 20% es considerado aceptable y un elemento con un área de defectos mayor que el 20% es considerado como rechazo.

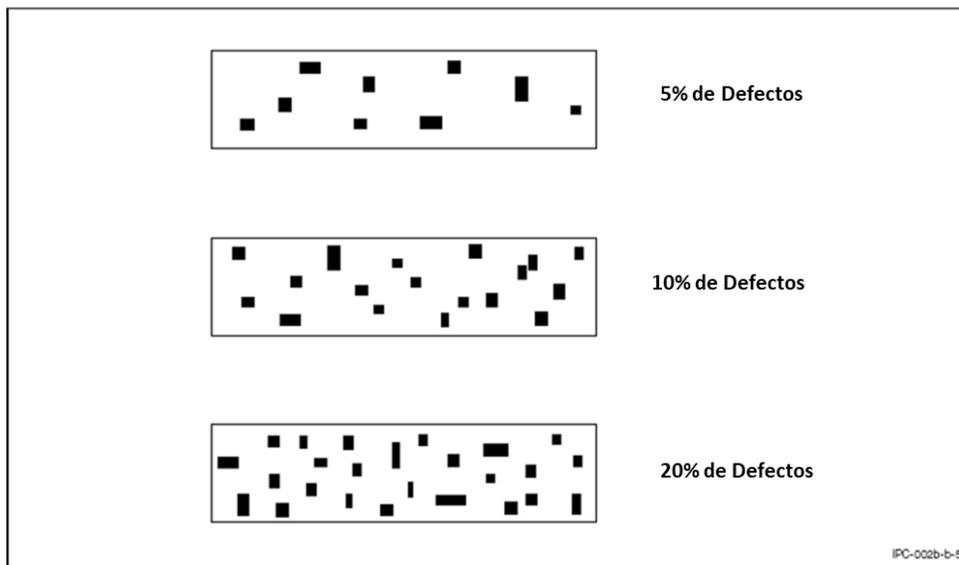


Figura 60 - Clasificación defectos soldabilidad. La imagen muestra la correlación de defectos utilizada para identificar los elementos aceptados o rechazados durante la prueba de soldabilidad. (Autoría Propia, 2020)

Establecer objetivo

Con este proyecto, se busca obtener un mejor conocimiento del proceso de impresión del número de parte 68156-4K7JE y de la influencia de los parámetros que pudieran tener efecto sobre el problema de rechazo de soldabilidad, para de esta manera disminuir el porcentaje de rechazos o desperdicio por lo menos en un 90% del material producido. Esto implica una reducción de material rechazado de acuerdo con la información obtenida en las últimas ordenes, de aproximadamente \$30,000 dólares, además de adquirir conocimiento sobre el proceso.

3.4.3 Medir

Identificar Factores

Para identificar todos los factores involucrados en el proceso de impresión, se llevó a cabo una reunión con el equipo para generar una lluvia de ideas para identificar los factores potenciales que pudieran afectar la capacidad de soldabilidad de los elementos.

En base a la experiencia se definieron finalmente los factores mostrados en la figura 61.

Factores	Unidad de medida	Equipo
Tipo de conductor	N/A	N/A
Numero de horno	N/A	Horno
Temperatura de curado	Grados °C	Horno
Grosor de impresion Humedo	Micras (um)	Profilometro
Grosor de impresion Curado	Micras (um)	Profilometro
Capas de impresion	Unidad	N/A
Operador	N/A	N/A
Turno	N/A	N/A
Secado	N/A	N/A
Limpieza de horno	N/A	N/A
Humedad	N/A	N/A
Substrato/Ceramica	N/A	N/A

Figura 61 - Identificación de factores. La figura muestra los factores identificados como relevantes por el equipo multi funcional, para ser considerados potencialmente en el experimento. (Autoría Propia, 2020)

Clasificar Factores

De igual manera, considerando la experiencia del grupo con productos similares y en el proceso mismo del número de parte 68156-4K7JE, se intentó clasificar los 12 factores inicialmente identificados. Esto a manera de reducir el tiempo y el costo que pudiera involucrar utilizar todas las variables/factores identificados. Finalmente se estableció que solo 4 factores serían considerados como primarios en una primera instancia:

- Horno: En la planta se cuenta con dos hornos (Horno #1 y Horno #2) que teóricamente son capaces de curar el conductor requerido por el cliente, a una temperatura de 850°C, la cual es la temperatura recomendada por el fabricante de la tinta para curarlo. Se busca utilizar ambos hornos en el experimento para identificar o descartar que el horno no sea un factor que origine el problema de soldabilidad.
- Temperatura: Este factor se refiere a la temperatura con la cual se cura la capa conductora. Se busca confirmar si una variación importante a la alza en la temperatura podría originar problemas de soldabilidad.
- Grosor húmedo: Es el grosor en el cual se realiza la impresión. Este grosor es verificado antes de curar la tinta conductora en el horno.
- Numero de capas: Son las capas de conductor que se imprimen en el sustrato. El cliente requiere que se impriman dos capas en la parte trasera del sustrato.

Definir estrategias para algunos factores

Todos los factores primarios fueron considerados de control, por lo que no fue necesario asignar estratégicos para ellos. Por otra parte, dentro de los factores restantes existen algunos relacionados con la mano de obra (operador, turno y secado). Estos fueron bloqueados para que no tuvieran efecto alguna en la respuesta ya que además por la experiencia del equipo no se consideraban relevantes para el experimento.

Validar sistemas de medida

Esta actividad fue sencilla, ya que solo había que validar el sistema de medida de un factor primario, siendo este el relacionado con el grosor en húmedo. Para medir el grosor de las capas impresas se utiliza un perfilómetro laser, el cual es verificado anualmente por el laboratorio interno y un laboratorio externo.

Describir conocimiento actual del efecto de los factores

Durante experimentos previos no controlados, se realizaron pruebas de un factor a la vez para experimentar sobre la condición de la soldabilidad con ciertas características en la impresión.

Se tenía la teoría de que condiciones de contaminación en el horno podrían estar contaminando la superficie del conductor y por lo tanto ocasionando que la prueba de soldabilidad no fuera aceptable. De igual manera, se realizaron pruebas en dos hornos diferentes, pero todo indicaba que el horno no sería una condición, esto considerando que la temperatura de dichos hornos estuviera a los 850°C que recomendaba el cliente. Aun así, se tenía duda sobre la estabilidad de las temperaturas de los hornos. Cuando un material es curado a una temperatura considerablemente más alta de la recomendada por el fabricante, la experiencia en proceso similares nos indicaba que ciertos materiales podrían tener una condición de “sobrecurado” lo cual afectaría la superficie de la tinta curada. Para descartar cualquier afectación por temperaturas de curado por arriba de los 850°C, se decidió como parte del experimento agregar el factor de temperatura con un valor de 875°C.

Toda esta información previa nos indicaba que de alguna manera los grosores de impresión en húmedo y por consecuencia en curado o quemado, serían los más importantes a seguir, sin dejar de lado su posible comportamiento en diferentes hornos y a diferentes temperaturas.

Determinar rangos y niveles

Basados en la experiencia del grupo de trabajo, se decidió trabajar para toda la experimentación con los rangos y niveles presentados en la tabla 15.

Tabla 15 - Factores y rangos

Factores Primarios	Rangos / Niveles
A- Temperatura de curado	850-875 °C
B- Grosor húmedo	30-50 um
C- Capas de impresión	1 / 2
D- Numero de Horno	#1 / #2

3.4.4 Pre-Analizar

Caracterizar factores

A manera de resumen, para seleccionar el diseño experimental se tomó en cuenta la siguiente información con las siguientes características:

- Factores primarios =4
- Niveles de factores cualitativos = 1
- Factores con características especiales = 0

Elegir tipo de diseño y Diseño experimental

Para poder realizar este experimento se otorgaron cinco días o turnos de producción (un operador y una maquina). Debido al pequeño número de pruebas que se consideraban para el experimento se tenía tiempo suficiente para poder secuenciar los experimentos, pero se optó por la opción de realizarlo de manera aleatoria.

El propósito de esta investigación es comprobar el efecto de las variables independientes (Factores) en la variable dependiente (Respuesta) principal que para propósitos del experimento se ha definido como la capacidad de soldabilidad del elemento. Por lo tanto, el diseño elegido deberá ser capaz de establecer el efecto de los factores sobre la variable de respuesta.

De acuerdo con la teoría del diseño de experimentos, el tipo de experimento recomendado para un caso de estudio como el de nuestra investigación, corresponde al diseño factorial 2^k . La figura 62 muestra los principales tipos de experimentos de acuerdo con su propósito de estudio.

Para mantener el costo del experimento lo más bajo posible, sin afectar sus propiedades, se decidió con el equipo de trabajo que para el factor de temperatura en el cual se tienen dos niveles (850°C y 875°C), se tomaría un substrato de cada repetición y sería dividido para después curar cada mitad del substrato por separado a las temperaturas de 850°C y 875°C .

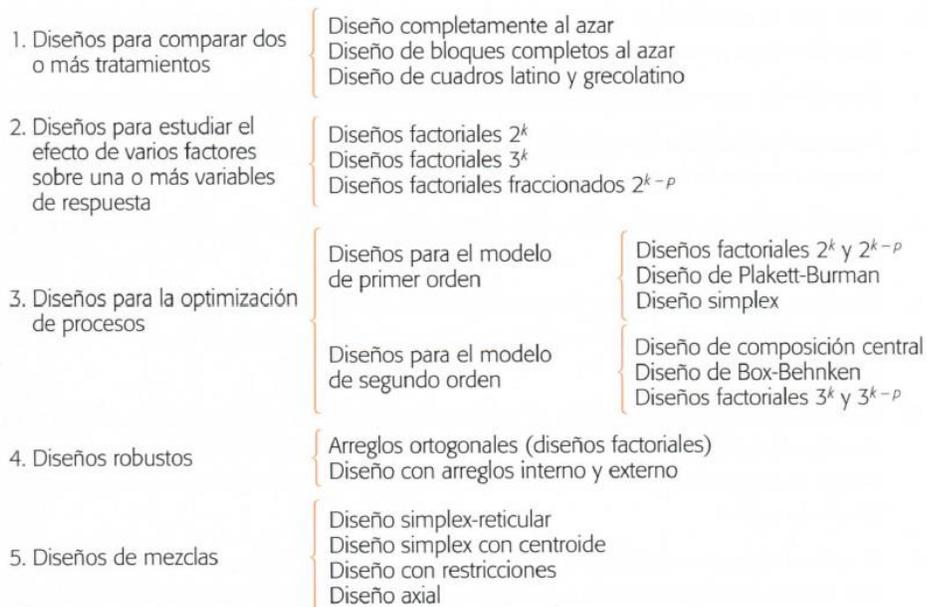


Figura 62 - Clasificación diseños de experimentos. La figura muestra los experimentos más comunes de acuerdo con el objetivo que se desea obtener como respuesta. Fuente: Bernal, 2012

Elegir niveles

Como parte del experimento, se procedió a establecer los niveles para el único factor cuantitativo del experimento, es decir el grosor en húmedo. Para los factores cualitativos, aun cuando solo se tenían dos posibilidades para cada uno de ellos, se hizo énfasis en identificar apropiadamente cada substrato con la temperatura, el tipo de conductor, el número de horno y el número de capas que serían impresas en cada substrato bajo prueba.

3.4.5 Experimentar

Preparar Experimento

Realizar el experimento no represento una tarea difícil ya que, a pesar de la magnitud del problema a resolver, los factores implicados fueron fáciles de identificar y de igual manera fácilmente podrían ser controlados. Lo importante era entrenar al personal involucrado, sobre todo operadores, para que las actividades fueran realizadas correctamente de acuerdo con el plan del experimento.

A manera de reforzar el alcance y las condiciones del experimento, se estableció lo siguiente con el personal participante:

- 1- Todos los substratos deberán ser identificados de acuerdo con el número de corrida del experimento.
- 2- Los lotes de tinta de conductor deberán ser nuevos, con botes que no hayan sido previamente usados o que pudieran estar contaminados.
- 3- Los grosores de cada capa impresa deberán ser verificados tanto por el operador como por el personal de calidad.
- 4- De las 5 columnas de elementos por cada substrato, se tomarán los grosores en húmedo únicamente de las columnas izquierda, central y derecha. Los grosores serán tomados para cada uno de los 9 elementos de cada columna.

Pruebas piloto

A manera de prueba antes de iniciar con el experimento, se realizaron diferentes ajustes para comprobar que los rangos de impresión de 30 a 50 um (micras) podían ser alcanzados y repetibles por la máquina de impresión. Los resultados fueron satisfactorios y no se presentaron problemas para alcanzar el rango menor y mayor previamente definidos.

Realizar experimento

El experimento fue realizado de acuerdo con la hoja de recolección de datos arrojada por Minitab 18. Las condiciones bajo las cuales se realizó el experimento se enlistan a continuación:

- 1- Cada corrida representa un sustrato impreso.
- 2- El grosor en húmedo fue impreso con tres valores, 30, 40 y 50 micras, esto con el fin de tener un punto intermedio que pudiera servir de referencia.
- 3- Un sustrato puede ser impreso con una o dos capas de conductor de acuerdo con el nivel del factor.
- 4- Cada sustrato fue curado/horneado a 850°C y 875°C de acuerdo con el nivel del factor "Temperatura".
- 5- Cada sustrato fue curado/horneado en dos diferentes hornos también dependiendo del nivel del factor "Horno", se tenían dos hornos disponibles, el Horno#1 y el Horno #2.
- 6- Una vez curado el material se tomaron 10 muestras de cada sustrato para realizar la prueba de soldabilidad. Ver anexo 5 para resultados de prueba de soldabilidad.

La tabla 16 muestra el orden de la corrida generada por Minitab para un diseño de experimentos factorial, el cual consistió en 32 corridas, sin repeticiones. De igual manera en el anexo 5 se presentan ejemplos de las corridas de del experimento de soldabilidad.

Tabla 16 - Matriz para experimento soldabilidad

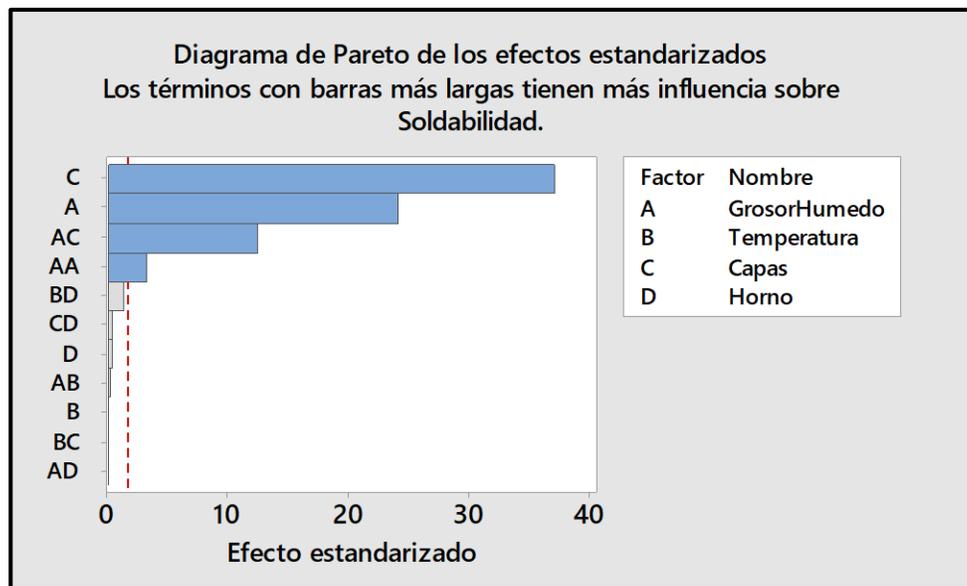
Orden para Corrida en base a Diseño Factorial 2K								
OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	GrosorHumedo (A)	Temperatura (B)	Capas (C)	Horno (D)	Soldabilidad
11	1	1	1	30	875	1	Dos	100
21	2	0	1	40	850	1	Dos	95
22	3	0	1	40	875	1	Dos	95
10	4	1	1	50	850	1	Dos	90
32	5	0	1	40	875	2	Dos	70
31	6	0	1	40	850	2	Dos	75
2	7	1	1	50	850	1	Uno	90
16	8	1	1	50	875	2	Dos	60
3	9	1	1	30	875	1	Uno	100
15	10	1	1	30	875	2	Dos	90
12	11	1	1	50	875	1	Dos	90
27	12	0	1	40	850	2	Uno	70
6	13	1	1	50	850	2	Uno	60
23	14	0	1	40	850	2	Dos	70
24	15	0	1	40	875	2	Dos	70
5	16	1	1	30	850	2	Uno	90
8	17	1	1	50	875	2	Uno	60
28	18	0	1	40	875	2	Uno	75
20	19	0	1	40	875	2	Uno	70
26	20	0	1	40	875	1	Uno	95
14	21	1	1	50	850	2	Dos	60
25	22	0	1	40	850	1	Uno	95
7	23	1	1	30	875	2	Uno	90
1	24	1	1	30	850	1	Uno	99
19	25	0	1	40	850	2	Uno	70
30	26	0	1	40	875	1	Dos	92
29	27	0	1	40	850	1	Dos	95
13	28	1	1	30	850	2	Dos	90
9	29	1	1	30	850	1	Dos	99
17	30	0	1	40	850	1	Uno	95
4	31	1	1	50	875	1	Uno	90
18	32	0	1	40	875	1	Uno	95

3.4.6 Analizar

Efecto de los factores y Determinar factores significativos

Una vez capturados los datos de respuesta en la corrida de acuerdo con la matriz del experimento para soldabilidad, se corrió el experimento y la primer información a analizar fue el diagrama de Pareto para la respuesta soldabilidad.

El diagrama de Pareto de la figura 63 nos muestra que, el mayor efecto de los factores se concentra en mayor relevancia en el factor “Capas”, seguido por el factor “Grosor_Húmedo”. Por último, se tiene también como factor significativo la relación entre “Grosor_Humedo_ y “Capas”. Todos los demás efectos/combinaciones son descartados como significativos por el diseño. El modelo de experimento seleccionado, de acuerdo con el experimento, represento una capacidad del 98.75% para explicar la variación en la soldabilidad.



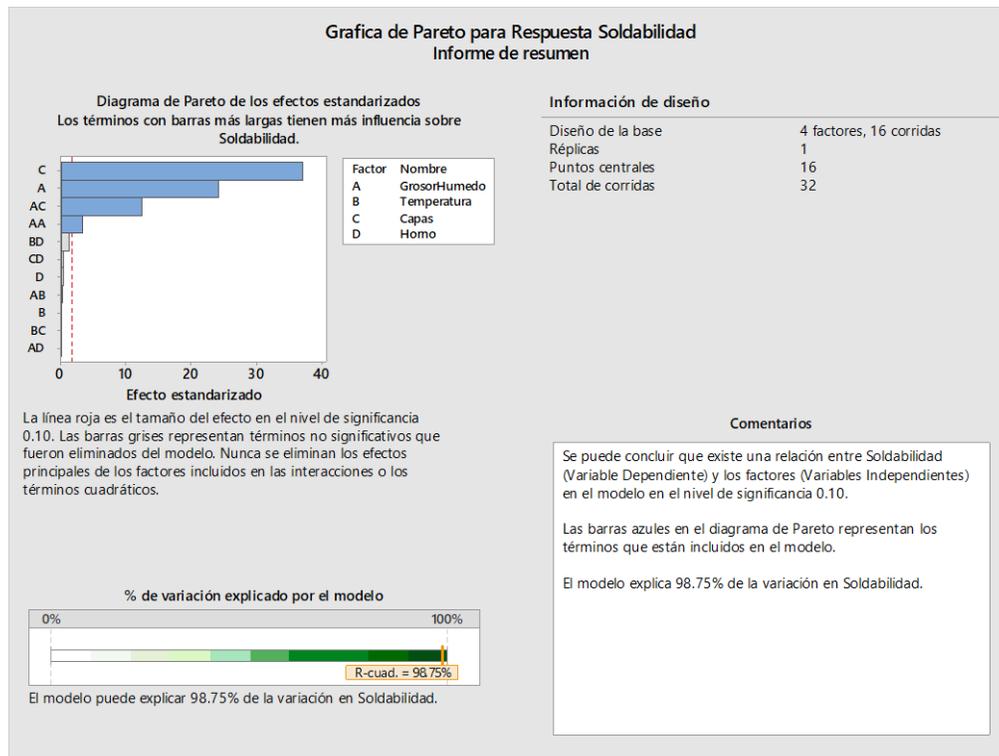


Figura 63 - Pareto respuesta soldabilidad. La figura muestra el diagrama de Pareto para la respuesta de soldabilidad y los factores que le afectan en mayor medida. (Autoría Propia, 2020)

Interpretación de resultados

A continuación, se analizó la gráfica de residuos (figura 64) para la respuesta de soldabilidad. En esta grafica podemos observar que no se observan patrones aleatorios o residuos grandes que pudieran comprometer la veracidad de la respuesta.

Es importante señalar que debido a que la respuesta de soldabilidad está basada en categorías respecto al estándar de aceptación para pruebas de soldabilidad, no se observa una cantidad considerable de puntos para los residuos. Se determino establecer categorías ya que la aceptación o rechazo de la prueba es de manera visual.

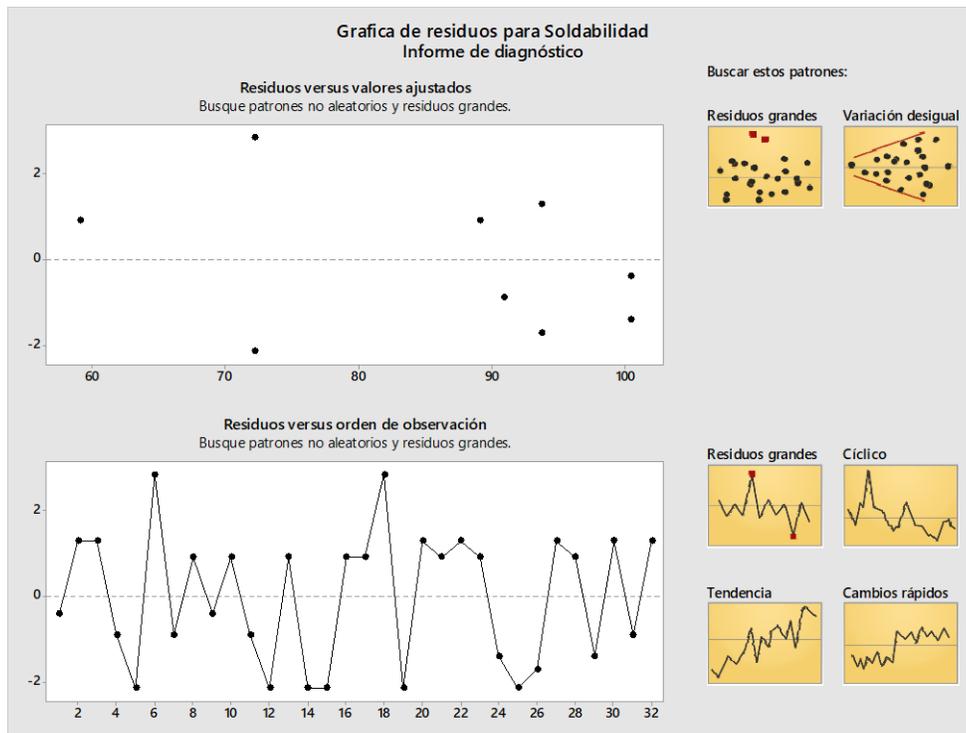


Figura 64 - Gráfica de residuos. La figura muestra las gráficas de residuos para la respuesta de soldabilidad y los factores que le afectan en mayor medida. (Autoría Propia, 2020)

Se analizó también la gráfica de interacciones, la cual nos muestra las posibles afectaciones de los diferentes factores por separado. En la figura 65 podemos observar la siguiente información resumidamente, considerando de antemano que las gráficas con fondo gris no muestran interacciones representativas estadísticamente:

- 1- Grosor_Humedo y Temperatura no muestran interacción, por lo tanto, el efecto de que pudiera tener ambas variables en la respuesta de soldabilidad es mínima.
- 2- El número de capas no tiene efecto alguno en relación con la temperatura sobre la soldabilidad.
- 3- Entre menor sea el grosor o más cercano a las 30 μm , más grado de aceptación tiene en combinación con la impresión de una capa una vez curada/horneada.
- 4- Cuando se imprimen dos capas, mientras mayor sea su grosor, menor será su grado de soldabilidad una vez que la capa ha sido curada/horneada.

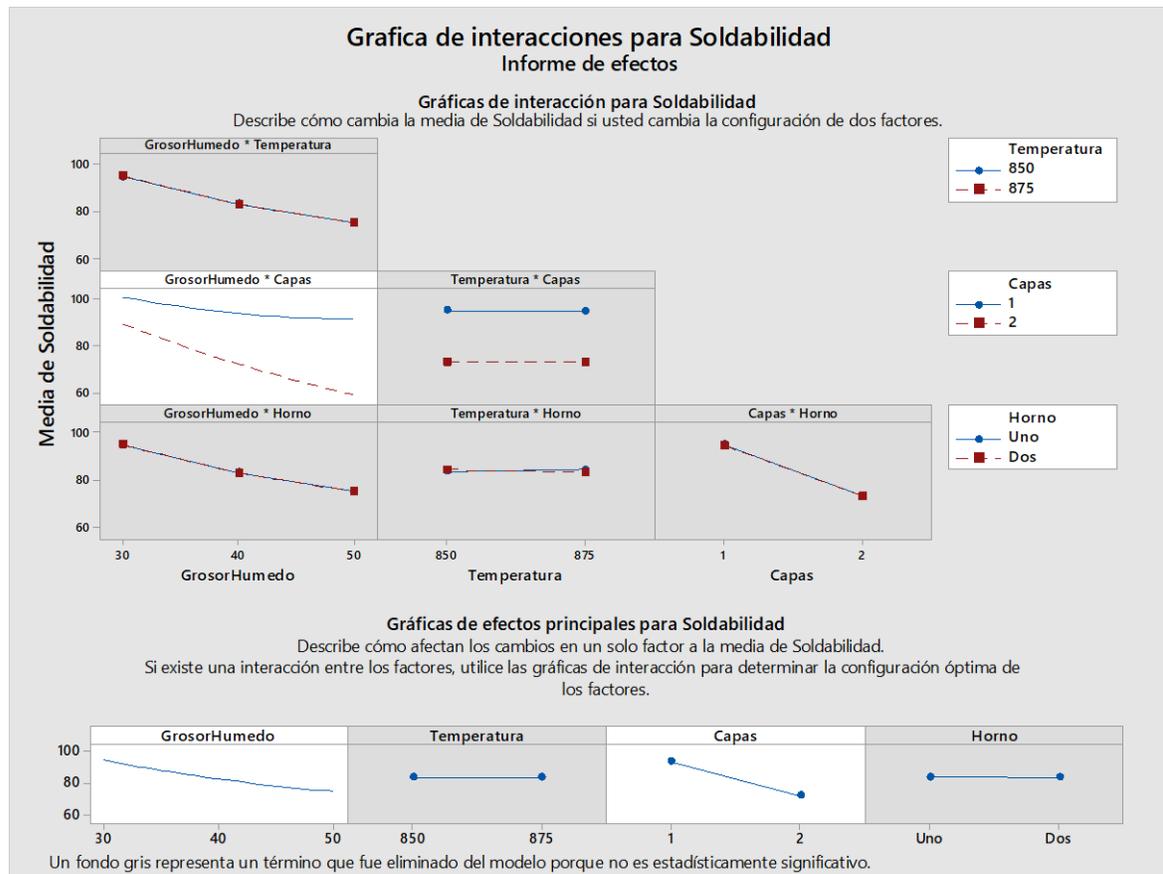


Figura 65 - Gráfica interacciones soldabilidad. La figura muestra las gráficas interacciones para la respuesta de soldabilidad. (Autoría Propia, 2020)

De igual manera se analizó la gráfica de efectos principales para la respuesta de soldabilidad (figura 66), en la cual, a manera de confirmación, se puede observar que los efectos de los niveles de temperatura no son significativos estadísticamente, así como el efecto de curar el material en diferentes hornos.

Por el contrario, se muestra un efecto en la variable de respuesta (soldabilidad) para las combinaciones de capas y grosor húmedo. Donde se obtiene un mejor porcentaje de cobertura de la soldadura en la prueba de soldabilidad al pintar con solo una capa y a un grosor entre 30 y 40 μm en húmedo.

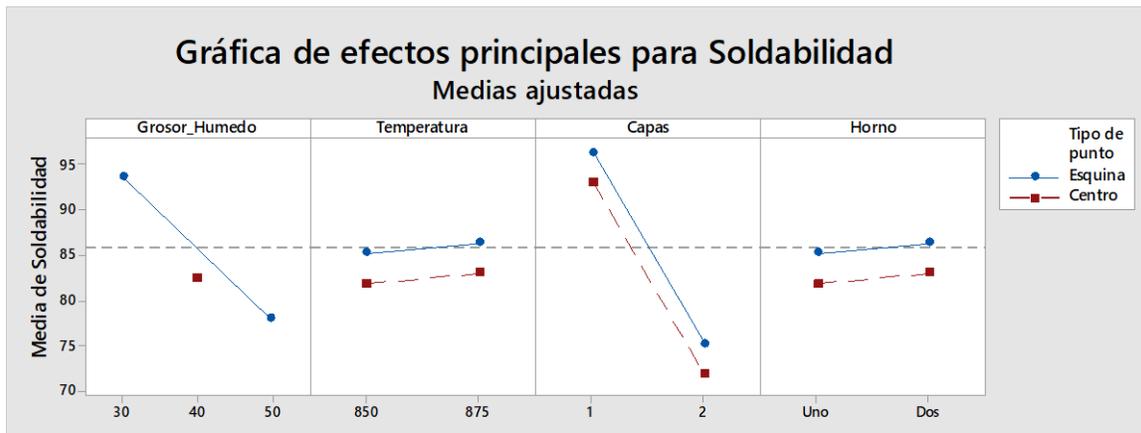


Figura 66 - Gráfica efectos principales. La figura muestra las gráficas de efectos principales para la respuesta de soldabilidad. (Autoría Propia, 2020)

Evaluar necesidad de nuevos experimentos

La influencia del factor o la variable cuantitativa “Grosor húmedo” junto con la variable cualitativa “Capas” quedó clara en el experimento realizado, por lo tanto, no se consideraron nuevos experimentos a realizar.

Únicamente se decidió dar seguimiento a las siguientes dos órdenes de producción una vez que se hubieran implementado los cambios originados a partir de la información del experimento realizado.

3.4.7 Mejorar

Conclusiones y recomendaciones

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el diseño de experimentos y en la prueba de soldabilidad, la actividad de este proyecto se dio por concluida con la presentación de actividades que buscarían ser implementadas en el proceso para poder asegurar que la prueba de soldabilidad podría ser aprobada una vez se iniciara una nueva orden de producción.

Las conclusiones principales del análisis están relacionadas al proceso de impresión, y se afirma que modificando los parámetros de impresión es posible obtener una prueba de soldabilidad satisfactoria de acuerdo con los criterios previamente establecidos y por lo tanto reduciendo los desperdicios en más de un 80%.

Además, con la modificación de estos parámetros, se podría conseguir una mayor estabilidad en la impresión y menor variación del proceso.

Las recomendaciones de manera general fueron las siguientes:

- Establecer y documentar los parámetros de impresión para la capa de conductor en húmedo y por consecuencia en quemado.
- Eliminar la segunda capa de conductor.
- Dado que no se tiene efecto alguno en el proceso por parte de la temperatura, se definirá una sola a manera de estandarización.
- El número de horno (uno y dos) podrán ser utilizados indistintamente para el curado de la capa de conductor.
- Realizar un monitoreo del proceso de impresión.

Implementar medidas

De los cambios propuestos en el proceso, la eliminación de una capa de conductor requería la aprobación del cliente ya que era un requerimiento de su parte. Se envió información acerca de los resultados de la prueba de soldabilidad en donde se mostraba que la eliminación de la segunda capa de conductor no afectaría a la propiedad de soldabilidad en las pruebas. Para considerar este cambio, el cliente solicitó se modificara el número de parte a manera de tener una mejor rastreabilidad del cambio propuesto, por lo tanto, se envió un dibujo actualizado en donde se eliminaba el uso de una segunda capa de conductor en el PN:68195-4K7JE. Ver anexo 6 para dibujo actualizado.

Para los demás cambios, no se requería aprobación del cliente ya que fueron modificaciones al proceso, y mientras el producto cumpliera con los demás requerimientos del dibujo el cliente no se ve afectado por estos cambios. De cualquier manera, las modificaciones propuestas al proceso fueron presentadas al equipo de ingeniería para ser implementadas.

De igual manera, el proceso para impresión del producto 68195-4K7JE fue actualizado y reflejado en la hoja de proceso "HP-SLI-034 Parámetros de impresión 68195-4K7JE", la cual se muestra en la figura 67 (Ver anexo 7).

Impresion No.	1- Conductor Frontal	2- Conductor Trasero	3- Conductor Pull thru Frontal	4- Conductor Pull thru Trasero	5- Resistencia Frontal	6- Resistencia Trasera	7- Dielectrico Frontal	8- Dielectrico Trasero	9- Estampado
Tipo de Tinta	Conductor	Conductor	Conductor Rebajado	Conductor Rebajado	Resistencia	Resistencia	Dielectrico	Dielectrico	Silicon Blanco
Tipo de Impresion	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print Flood
Artwork Numero y Revision	68195 Rev B		68195 Rev B		68195 Rev B		68195 Rev B		68195 Rev B
Pantalla Mesh/ Emulsion (Ref)	280-325 / 0.5 - 1.0		200-280 / 0.8 - 1.0		280 / 0.8-1.0 µm		325 / 0.8-1.0 µm	325 / 0.8-1.0 µm	255-40Y / 0.4 µm
Tinta numero de parte	D99I200		D99I200 (Rebajada con Thinner I01-212 al 6%)		D99I236LB		D99I043		SM-962
Grosor humedo (Ref)	35-37 µm	35-37 µm	25-35 µm	25-35 µm	35-38 µm	35-38 µm	35-40 µm (Incluyendo resistencia curada)	35-40 µm (Incluyendo resistencia curada)	N/A
Grosor Secado (Ref)	20-24 µm	N/A	20-22 µm	N/A	20-22 µm	N/A	21-25 µm (Incluyendo resistencia curada)	N/A	N/A

Figura 67 - Hoja de proceso impresión. La figura muestra la hoja de proceso en la cual se definen los parámetros de impresión de acuerdo con las modificaciones propuestas a partir del diseño de experimentos. (Autoría Propia, 2020)

3.4.8 Controlar

Implementar controles

Dado que el defecto de soldabilidad tiene su origen debido a un grosor/espesor muy alto durante la capa de impresión de conductor, los controles para evitar una condición no aceptable en la prueba de soldabilidad están enfocados en la impresión de esta capa.

La impresión del conductor estará controlada por los siguientes elementos:

- 1- Hoja de proceso “HP-SLI-034 Parámetros de impresión 68195-4K7JE”
- 2- Reporte de espesores FRMMFG-002
- 3- Perfilometro G1839
- 4- Dibujo 68195 Rev C
- 5- Muestra de 5 piezas para prueba de soldabilidad en laboratorio por orden o lote.

Dichos controles se establecen en el plan de control “CP-SLI-016_68195-4K7JE” del cual se muestra una imagen en la figura 68. En esta imagen se presentan los principales controles implementados para lograr la impresión requerida para reducir el riesgo del problema de soldabilidad.

PROQAD-004										
040	Conductor Print Back Side Impresión de Conductor lado trasero	Printer Impresora	6	Print Conductor Back Side Impresión de Conductor lado trasero	According to BOM De acuerdo a lista de materiales	Visual	1 Tabilla	At Set up En Ajuste	WR-SL-006-06 Thickness Report FRMIFG-002 Reporte de Espesor FRMIFG-002	Quarantine suspect material, identify with nonconforming tag and contact production supervisor or process engineer (Follow Non-conforming procedure PROQAD-004) Poner en cuarentena el material sospechoso identificar con etiqueta de material no conforme contactar al supervisor o ingeniero de procesos (según Procedimiento de Material No Conforme PROQAD-004)
			7	Print Location and Appearance Localización de la impresión y Apariencia	Alignment Alineación Appearance Incomplete Print, Foreign Particles inclusions, shorted trace Apariencia Impresión Incompleta, Partículas Extrañas, Segmentos cortos	Visual Alineación Visual Automated Vision Equipment Equipio Automatizado de Visión	100% (Operator) 100% (Operator)	At Set up & Last Piece En Ajuste y Ultima Pieza	Glass Magnifier 3x Lupa 3x	Quarantine suspect material, identify with nonconforming tag and contact production supervisor or process engineer (Follow Non-conforming procedure PROQAD-004) Poner en cuarentena el material sospechoso identificar con etiqueta de material no conforme contactar al supervisor o ingeniero de procesos (según Procedimiento de Material No Conforme PROQAD-004)
050	Conductor Curing Back Side Curado de Conductor Lado trasero	Furnance 850°C Horno 850°C	8		Per Parameters in Process Sheet HP-SLI-009 Por parámetros en Hoja de Proceso HP-SLI-009	Visual	1	At Set up En Ajuste	Temperture Controller Controlador de Temperatura	Change Profile and check Stability Quarantine suspect material, identify with nonconforming tag and contact production supervisor or process engineer (Follow Non-conforming procedure PROQAD-004) Cambiar el Perfil y Verificar Estabilidad Poner en cuarentena el material sospechoso identificar con etiqueta de material no conforme contactar al supervisor o ingeniero de procesos (según Procedimiento de Material No Conforme PROQAD-004)
			9	Thickness Espesor	Reference HP-SLI-043 Referencia HP-SLI-043	Profilometer G1839 Profilómetro G1839	1	At Set up & Last Piece En Ajuste y Ultima Pieza	Thickness Report FRMIFG-002 Reporte de Espesor FRMIFG-002	Quarantine suspect material, identify with nonconforming tag and contact production supervisor or process engineer (Follow Non-conforming procedure PROQAD-004) Poner en cuarentena el material sospechoso identificar con etiqueta de material no conforme contactar al supervisor o ingeniero de procesos (según Procedimiento de Material No Conforme PROQAD-004)
			10	Appearance Apariencia	Surface Cracks, Visual Defects (Per Drawing) Quebraduras en sustrato Defectos Visuales (De acuerdo a Dibujo)	Visual Inspection Inspección Visual	5 pcs	Each Lot Cada Lote	Glass Magnifier, Production Report, Work Instruction, visual Aids and Drawing specifications, Microscopio Reporte de Produccion Instrucciones de Trabajo, Ayudas Visuales. Y Especificaciones de dibujo. Visual Aids Ayudas Visuales.	Quarantine suspect material, identify with nonconforming tag and contact production supervisor or process engineer (Follow Non-conforming procedure PROQAD-004) Poner en cuarentena el material sospechoso identificar con etiqueta de material no conforme contactar al supervisor o ingeniero de procesos (según Procedimiento de Material No Conforme PROQAD-004)

Figura 68 - Plan de control. La figura muestra el plan de control en donde se definen los controles para el espesor de la capa de conductor del número de parte 68195-4K7JE. (Autoría Propia, 2020)

Validar resultados

La experiencia del experimento fue muy positiva y constructiva. Utilizando un diseño de experimentos sencillo se obtuvo prácticamente eliminar el defecto de soldabilidad no aceptable durante la prueba de laboratorio.

Una vez completadas las implementaciones y transcurridos un par de meses, se monitorearon los grosores de impresión para la capa conductiva, así como los resultados de laboratorio para la prueba de soldabilidad.

Después de analizar dos órdenes de producción con las mejoras implementadas durante el año 2019, se observó que ninguna de estas fue rechazada por algún defecto relacionado con la prueba de soldabilidad.

De igual manera, para confirmar la consistencia de los resultados en la impresión de conductor, se realizó un estudio de capacidad en la siguiente orden inmediata de producción una vez implementados los controles. El asegurar una variación mínima en el proceso de impresión, nos aseguraba de antemano que los resultados en la prueba de soldabilidad serían satisfactorios. En la figura 69 se muestra un estudio de capacidad para el grosor en húmedo, de la primer orden después de implementados los cambios en base al experimento.

El factor por medir en este estudio corresponde al grosor en húmedo, ya que al asegurarnos de controlar este elemento, las posibilidades de tener una soldabilidad aceptable son muy altas. La capacidad del proceso dadas los rangos de impresión, se considera muy buena en base a la orden verificada, ya que se tiene una capacidad del 2.03. Es importante mencionar que esta capacidad viene dada por los amplios rangos en los cuales la tinta conductora nos permite trabajar en la impresión y los cuales no son difíciles de alcanzar y mantener.

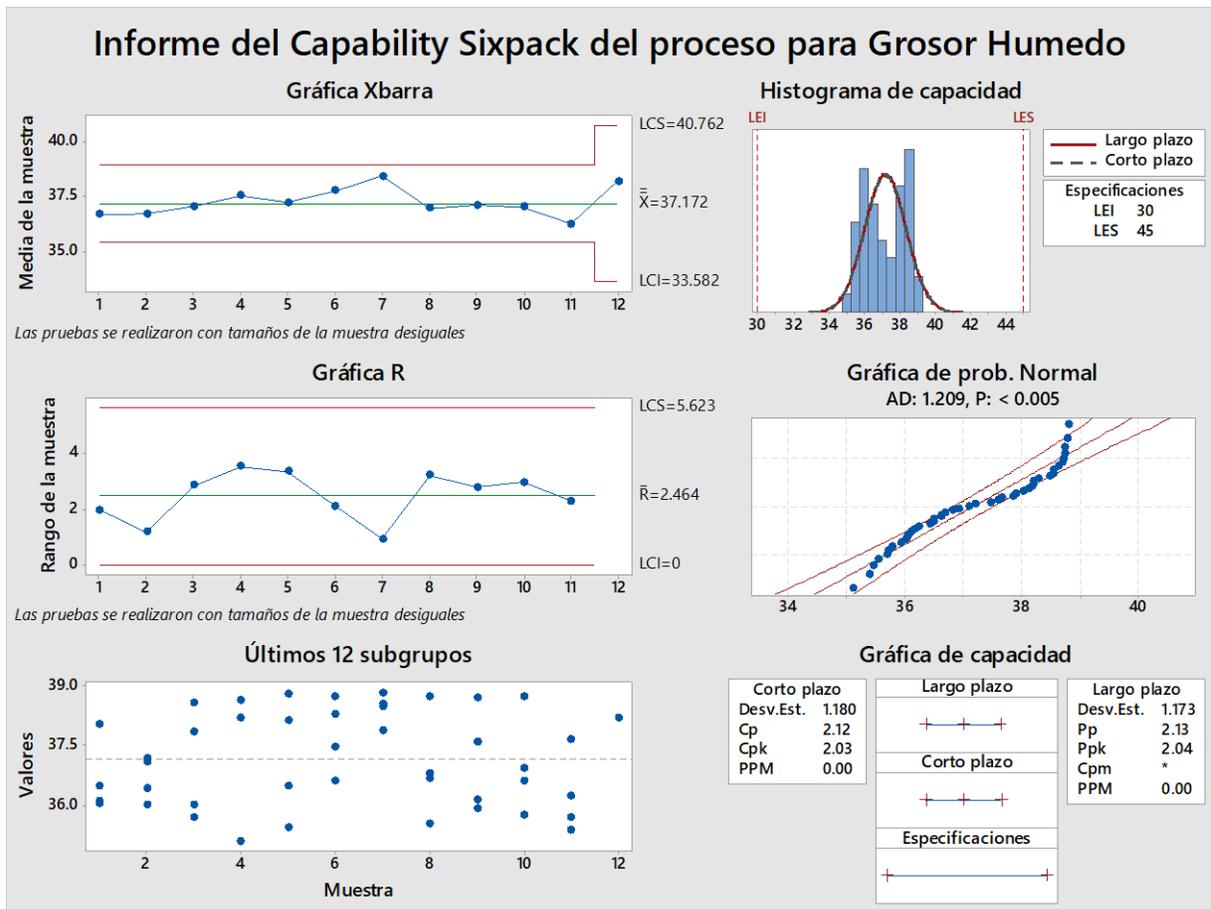


Figura 69 - Estudio de capacidad. La figura muestra un estudio de capacidad para el espesor en húmedo para la capa de conductor del número de parte 68195-4K7JE bajo la orden M957180. (Autoría Propia, 2020)

A continuación, en la figura 70 se presentan los defectos de las ordenes de producción M957180 y M967620, siendo estas las primeras dos órdenes procesadas con las modificaciones al proceso de impresión del conductor. Aun cuando se tiene defectos relacionados con otras condiciones, la prueba de soldabilidad ha sido aceptada en un 100% de las muestras tomadas para cada orden. Por lo tanto, se considera una eliminación del defecto de soldabilidad en el 100 % de las muestras.

Situacion despues de experimento		
Orden# M957180	PN:68195-4K7JE	
Cantidad de la orden =	1000	pcs
Defectos		Cantidad
Impresion desalineada	12	12
Conductor faltante	5	5
Mal corte	15	15
Elemento quebrado	11	11
Dielectrico desprendido	2	2
Contaminacion	15	15
Estampado ilegible	17	17
Valor resistivo alto/bajo	20	20
Prueba Soldabilidad	0	0
Defectos inspeccion		97
Total scrap		903
Yield		90.30%
Orden# M967620	PN:68195-4K7JE	
Cantidad de la orden =	1000	pcs
Defectos		Cantidad
Impresion desalineada	8	8
Conductor faltante	7	7
Mal corte	14	14
Elemento quebrado	16	16
Dielectrico desprendido	4	4
Contaminacion	12	12
Estampado ilegible	10	10
Valor resistivo alto/bajo	18	18
Prueba Soldabilidad	0	0
Defectos inspeccion		89
Total scrap		911
Yield		91.10%

Figura 70 - Defectos después de experimento. La figura muestra la relación de defectos de las ordenes siguientes a las mejoras del proceso del número de parte 68195-4K7JE, ordenes M957180 y M967620. (Autoría Propia, 2020)

CAPÍTULO IV.

RESULTADO

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1. Resultados objetivo general

A lo largo del desarrollo de este proyecto, se utilizaron varias herramientas de la metodología de seis sigma para buscar una posible solución al problema de soldabilidad descrito al inicio de este documento.

La investigación se centró en el uso de la técnica estadística de diseño de experimentos para permitir identificar y cuantificar las causas de un efecto en un estudio experimental. Con el fin de lograr los objetivos generales y específicos planteados al inicio de la tesis, se utilizó la información recolectada durante la investigación y fue capturada en el software de minitab 18 como se mostró en el capítulo III.

El objetivo general de esta tesis era poder dar solución al problema de soldabilidad era identificar y controlar los contribuyentes al problema mencionado. Una vez que se recolectaron datos, se realizó el experimento y se analizaron los datos por medio de la técnica de diseño de experimentos fue posible identificar los principales contribuyentes al problema de soldabilidad y que originaban que el material (resistencias) fuera rechazado durante las pruebas de laboratorio.

Por medio de esta técnica, se logró concluir que el defecto de soldabilidad tenía una fuerte relación con las capas de impresión del conductor y por lo tanto al grosor en el cual eran impresas durante las primeras ordenes del producto antes de identificar el problema.

El requerimiento del cliente indicaba que se debían imprimir dos capas de conductor en el elemento (resistencia), pero al hacer esto, la capa de conductor resulta con un grosor que al exceder una dimensión empezaba a generar los problemas de soldabilidad.

Una vez analizada la información, se identificó que era necesario reducir las capas de impresión del conductor a solo una y mantener la misma impresión del conductor en los rangos definidos en el capítulo III.

De esta manera, el elemento identificado como principal contribuyente y que debía ser controlado es el grosor de la impresión del conductor. Al controlar el grosor de la impresión del conductor, se aseguraba que la prueba de soldabilidad en las pruebas de laboratorio sería satisfactorias y por lo tanto aceptadas.

El problema de soldabilidad fue resuelto en un 100%, ya que actualmente a partir de las mejoras implementadas en el proceso, como resultados del uso de las herramientas seis sigma, no se han presentado casos de material rechazado por la condición de mala soldabilidad.

Por lo tanto, una vez conociendo estos resultados, se puede afirmar que las hipótesis planteadas al inicio de esta investigación son determinantes y se concluye que la hipótesis alternativa es aceptada ya que se logró establecer valores adecuados para el proceso de impresión, en este caso el espesor de impresión, y como resultado el problema de soldabilidad fue reducido en por lo menos un 90%.

4.2. Resultado Objetivo específicos

Para poder solucionar el problema de soldabilidad, era necesario cumplir con objetivos específicos que nos permitieran obtener una solución al problema de soldabilidad. Dichos objetivos nos permitirían sentar las bases para la solución del problema y tener información con la cual principalmente se pudiera alimentar el diseño de experimentos utilizado.

Primeramente, fue posible identificar las variables del proceso de impresión, las cuales se fueron reduciendo a medida que se recolectaba información y se fueron

descartando algunas de ellas por no ser consideradas relevantes para la solución del problema o porque no mostraron relación alguna con la solución.

Después, se analizó información histórica del defecto de soldabilidad, siendo posible identificar las dos ordenes anteriores al momento de realizar esta investigación. La información mostraba que el problema de soldabilidad se presentaba de manera frecuente y permanente en las ordenes procesadas hasta antes de la investigación.

De igual manera, como parte de la solución del problema, fue necesario identificar el flujo del proceso para observar cualquier situación que pudiera ocasionar que el problema de soldabilidad se presentara.

Finalmente, por medio de la técnica de diseño de experimentos y realizando una corrida con los potenciales factores contribuyentes al problema de soldabilidad, se identificó como principales contribuyente al problema de soldabilidad a el numero de capas de impresión y al grosor de impresión de la capa de conductor.

Uno de los contribuyentes, el numero de capas de impresión, fue sugerido al cliente para ser modificado y establecerlo en solo una capa en lugar de dos. Aun cuando era posible tener una soldabilidad aceptable utilizando dos capas de impresión de conductor, el riesgo de que el material fuera rechazado por mala soldabilidad era más alto.

Al establecer la impresión del conductor con solo una capa, el riesgo se reducía de manera considerable y la funcionalidad del producto seguía siendo la misma o mejor que al utilizar dos capas de impresión.

Por otra parte, el control de la impresión de conductor se logró a través de establecer rangos de impresión, los cuales serian monitoreados por medio de graficas de control para grosores en húmedo. Mientras se cumpla con estos rangos establecidos, el problema de soldabilidad puede considerarse de bajo riesgo o nulo.

CAPÍTULO V.
CONCLUSION

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

Con relación a los procesos en la industria, se pueden tener situaciones en donde ante un problema que se nos presenta, muchas veces tratamos de encontrar la solución por medio de la modificación de parámetros o ajustes sin llevar un registro de los cambios realizados, mucho menos en ocasiones se tiene la practica de realizarlo de manera metodológica, ya sea por cuestiones de tiempo o por el trabajo que en ocasiones puede llegar a significar.

A pesar de que el diseño de experimentos es una herramienta eficaz para mejorar y optimizar procesos de productos, la aplicación de esta técnica no es muy común en las empresas. En muchas ocasiones los responsables de algún proceso tienen usos limitados en cuanto a técnicas estadísticas para poder solucionar un problema. En ocasiones no se requiere de ser un experto en estadística para poder encontrar una solución sencilla a determinado problema, mucho menos en la época actual en donde se cuenta con programas de estadística que son sencillos de utilizar y ofrecen herramientas para ingresar y analizar información.

El objetivo fundamental de esta tesis era desarrollar la solución a un problema por medio del uso básico de la técnica de diseño de experimentos, en donde se fueron enunciando los pasos de la metodología y después replicando los mismos pasos con el uso de datos reales en el capítulo III.

La aplicación de la metodología realizada en la planta de Victoreen de México y su posterior evaluación ha permitido validar la utilidad de este método para encontrar la solución del problema de soldabilidad. Dicha aplicación resulto ser satisfactoria ya que se consiguió prácticamente identificar los contribuyentes del problema y eliminar el defecto mencionado.

Para dar seguimiento al objetivo fundamental de esta tesis, se dio seguimiento a varias etapas complementarias las cuales se mencionan a continuación:

- Obtener información previa del problema: Para poder dar solución al problema de soldabilidad fue necesario primeramente identificar la situación actual que nos diera información sobre la gravedad y la frecuencia con que se presentaba el defecto de soldabilidad.
- Identificar las potenciales variables independientes: Las variables independientes son aquellas que podían ser modificadas y nos permiten evaluar como afectan la respuesta (variable dependiente) de un problema. Para propósito de la investigación fue necesario identificar aquellas variables consideradas como factores potenciales que podrían originar el problema de soldabilidad.
- Desarrollar el experimento en base a las variables identificadas: La metodología del diseño de experimentos fue explicada durante el capítulo III. Una vez identificadas las variables se selecciono un diseño de experimento acorde a los factores y el objetivo de este (respuesta) que pudieran ayudarnos a encontrar una solución al problema.
- Validar los resultados: Una vez realizado el experimento y de haber analizado los datos, se implementaron mejoras y controles en el proceso, esto con el fin de mantener y replicar los resultados obtenidos durante la experimentación. De igual manera, los resultados fueron validados dando seguimiento a ordenes de producción después de los controles implementados y se comprobó que las mejoras pudieron mantenerse.

Por medio del desarrollo de los puntos anteriores, fue posible demostrar que al mantener un proceso controlado fue posible manufacturar resistencias aceptables en cuanto a la condición de soldabilidad. En el caso de las resistencias y el problema de soldabilidad se hizo énfasis en controlar el grosor de impresión para el conductor en húmedo.

Por otra último, no fue posible relacionar el problema de soldabilidad con relación a la utilización de diferentes hornos, esto con la teoría de posibles contaminaciones en alguno de ellos que originaran el problema.

5.2 Recomendaciones

En base al trabajo realizado, es recomendable transportar el uso de las herramientas de seis sigma y en especial el diseño de experimentos a otros productos y procesos que representen un problema considerable. La metodología utilizada para esta investigación es en gran manera adaptable para dar solución a diferentes situaciones similares en la industria.

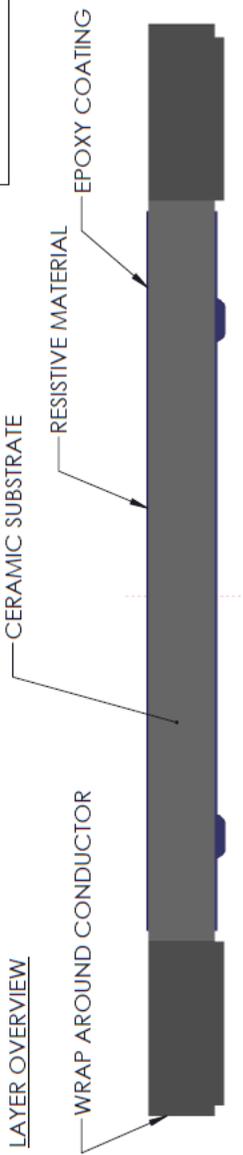
Ante problemas donde en ocasiones es difícil no obtener una respuesta con solo analizar la información, es recomendable hacer uso de los avances en informática relacionados con el análisis estadístico. Programas como minitab, utilizado en esta investigación, ofrecen un amplio rango de opciones para realizar un análisis de la información.

De igual manera es recomendable que el análisis del problema sea preferentemente en equipo, donde se cuente con la experiencia y los puntos de vista de distintas áreas, en este caso del proceso de manufactura. De esta manera es posible poder hacer un análisis más concreto al momento de identificar factores que pudieran afectar un proceso o producto. También es importante involucra al equipo de trabajo ya que por medio de su experiencia es posible eliminar factores que tal vez en un principio sean considerados como significativos pero que al compartir información con el equipo algunos de estos ellos puedan ser descartados, haciendo posible que el análisis sea más sencillo, rápido y eficiente.

Referencias

- Bernal, J. J. (06 de Noviembre de 2012). *Diseño de experimentos (DOE): Para que sirve y como realizarlo*. Obtenido de <https://www.pdcahome.com/2117:https://www.pdcahome.com/2117/disenodeexperimentosparaquesirveycomorealizarlo/>
- Castillo, J. C. (2017). *Electronica, Electricidad y Electronica*. Madrid: Editex.
- Eckes, G. (2004). *El Six Sigma para todos*. Bogota: Editorial Norma.
- Fraile, F. G. (2003). *Seis sigma*. Madrid: FC Editorial.
- Gilleo, K. (1996). *Polymer Thick Film*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Naucalpan de Juarez: Prentice-Hall.
- Miguel, P. A. (2009). *Electronica*. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Tecnologia de montaje superficial. (12 de Diciembre de 2018). *Tecnologia d emontaje superficial*. Obtenido de Tecnologia de montaje superficial: <https://tecnologiademontajesuperficial.es.tl/>
- Vazquez, E. J. (2006). *Analisis y mejoramiento de la calidad*. Mexico, D.F.: Editorial Limusa.
- Vazquez, E. J. (2008). *Seis-Sigma, Metodologia y Tecnicas*. Mexico, D.F.: Editorial Limusa.
- William Mendenhall, R. J. (2010). *Introduccion a la probabilidad y estadistica*. Mexico D.F.: Cengage Learning.

PART NO. **68156**

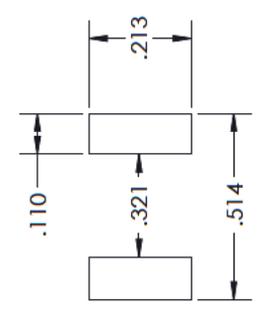


Recommended solder profile (J-STD-020C Fig 5.1) except with the information in the table below. Recommended 10 mil stencil thickness. Recommended SAC 305 Solder

TEMPERATURE	ΔT SECONDS
25 to 150°C	150 s +/- 5s
150 to 200°C	125 s +/- 5s
200 to 221°C	25 s +/- 5s
221 to 245°C	30 s +/- 5s
245 to 100°C	90 s +/- 5s

Solderability tested IAW J-STD-002D:
 Visual acceptance B1,
 Coating durability category 1,
 Solder temp. 245C +/-5C,
 No preconditioning,
 80% coverage on bottom side pads,
 Manually dipped

SOLDER PAD RECOMMENDATION:



customer source controlled drawing no approval changes to be made without customer approval

THIS PRINT AND ALL INFORMATION APPEARING THEREON IS THE PROPERTY OF OHMITE MANUFACTURING COMPANY. NEITHER THE PRINT NOR THE INFORMATION THEREON MAY BE REPRODUCED OR USED IN ANY MANNER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF OHMITE MANUFACTURING COMPANY. AUTHORIZED BY: OHMITE MANUFACTURING COMPANY.



PART DESCRIPTION	11J SMD CHIP
SCALE:	FULL
DWG. NO.	68156

DIMENSIONS ARE IN INCHES PAGE:2-3

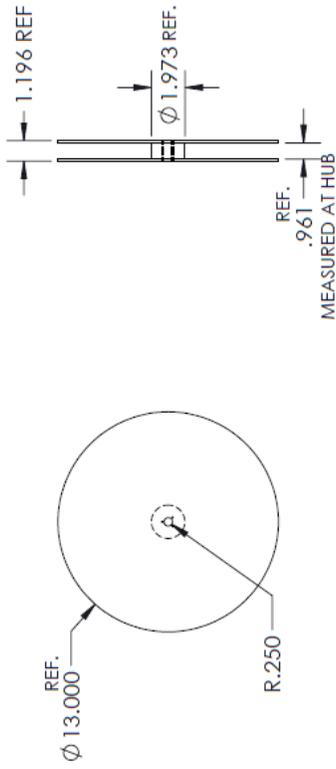
TOLERANCE ANGLES	±1/2°
TWO PLACE DEC.	±.062
THREE PLACE DEC.	±.031
FRACTIONS	±1/64
FEATURES ON ϕ	±.010
UNLESS OTHERWISE NOTED	
DRAWN BY	M.HERRERA 051518
CHECKED BY	M.WEST 051518
RELEASED	

MATERIAL	N / A
PLATING	N / A
HEAT TREAT	N / A

A	6890	MW	020918	BY	DATE
B	7027	MW	022818		
C	7007	MW	021818		
D	7143	MW	050918		
E	TBD	MW	061418		
CHG	E.C.N.				

PART NO. 68156

TAPE & REEL DIMENSIONS:



NOT FOR INSPECTION

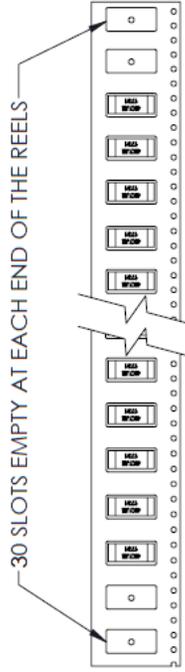
Approved
Ken Cowan
 Digitally signed by Ken Cowan
 Date: 2018.06.14 11:43:43 -07'00'
 customer source controlled drawing no changes to be made without customer approval

DIMENSIONS ARE IN INCHES

THIS PRINT AND ALL INFORMATION APPEARING THEREON IS THE PROPERTY OF OHMITE MANUFACTURING COMPANY. NEITHER THE PRINT NOR THE DRAWING IS TO BE REPRODUCED OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, ELECTRONIC OR MECHANICAL, INCLUDING PHOTOCOPYING, RECORDING OR DIVULGED TO ANY OTHER PERSON UNLESS SPECIFICALLY AUTHORIZED BY OHMITE MANUFACTURING COMPANY.



PAGE: 3-3



TOLERANCE ANGLES	±1/2°
TWO PLACE DEC.	±.062
THREE PLACE DEC.	±.031
FRACTIONS	±1/64
FEATURES ON ϕ	±.010
UNLESS OTHERWISE NOTED	
DRAWN BY	M.HERRERA 051518
CHECKED BY	M.WEST 051518
RELEASED	

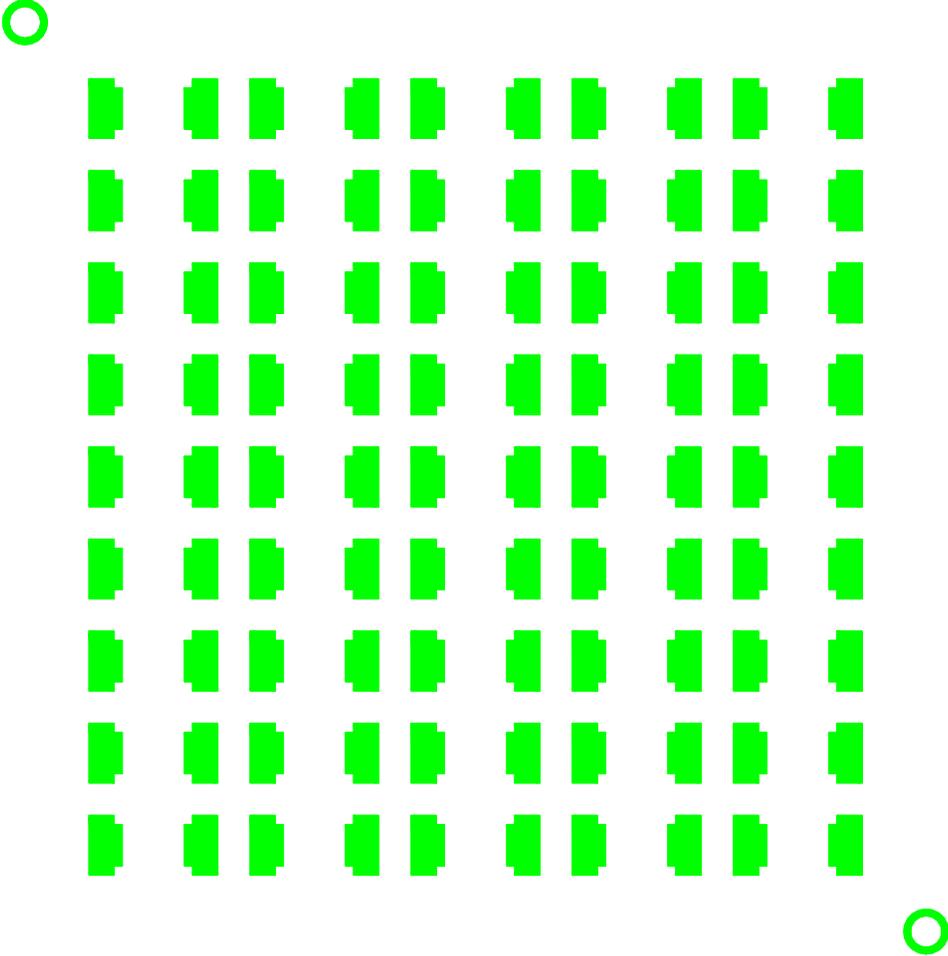
MATERIAL	N/A
PLATING	N/A
HEAT TREAT	N/A

CHG	E.C.N.	BY	DATE
A		MW	020918
B		MW	022818
C		MW	021818
D		MW	050918
E		MW	061418

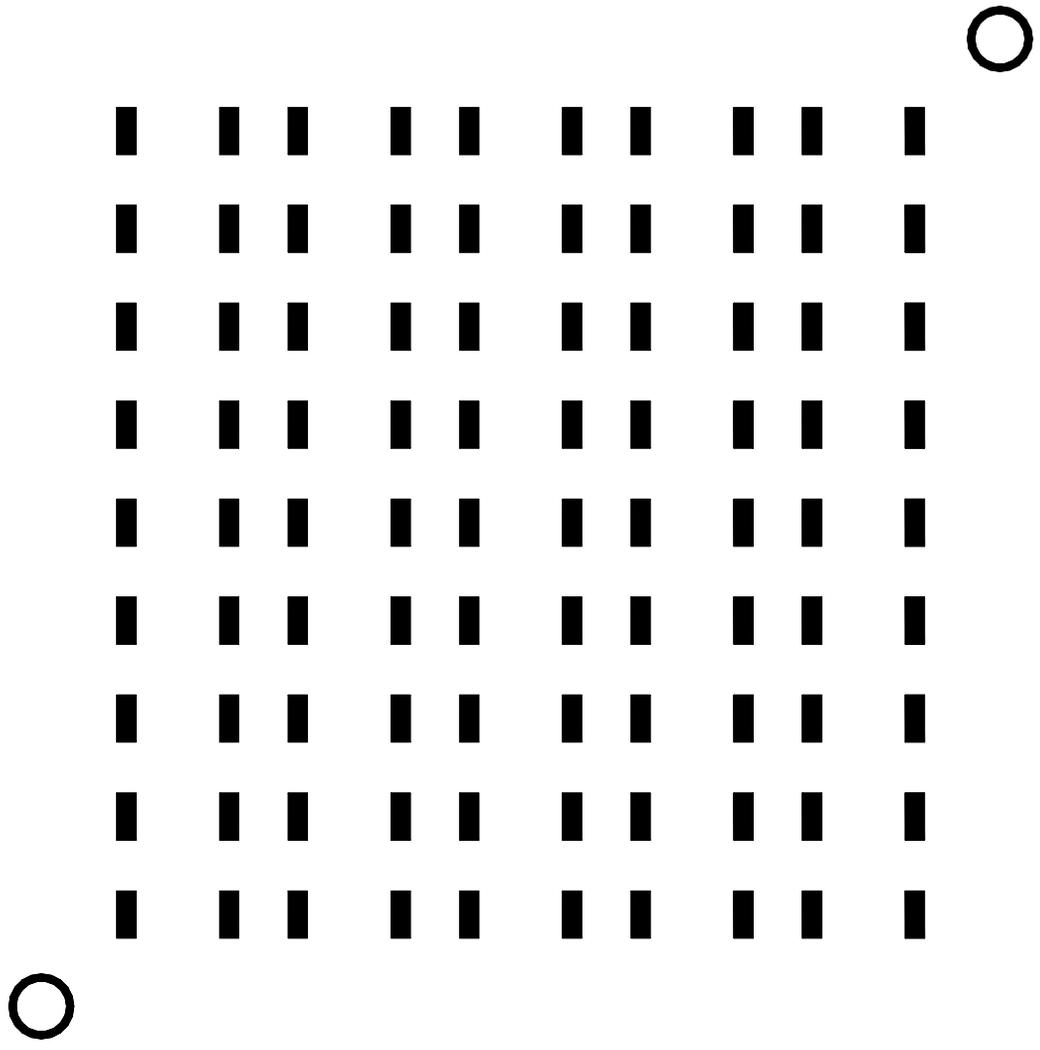
PART DESCRIPTION
 11J5MD CHIP

SCALE: FULL
 DWG. NO. 68156

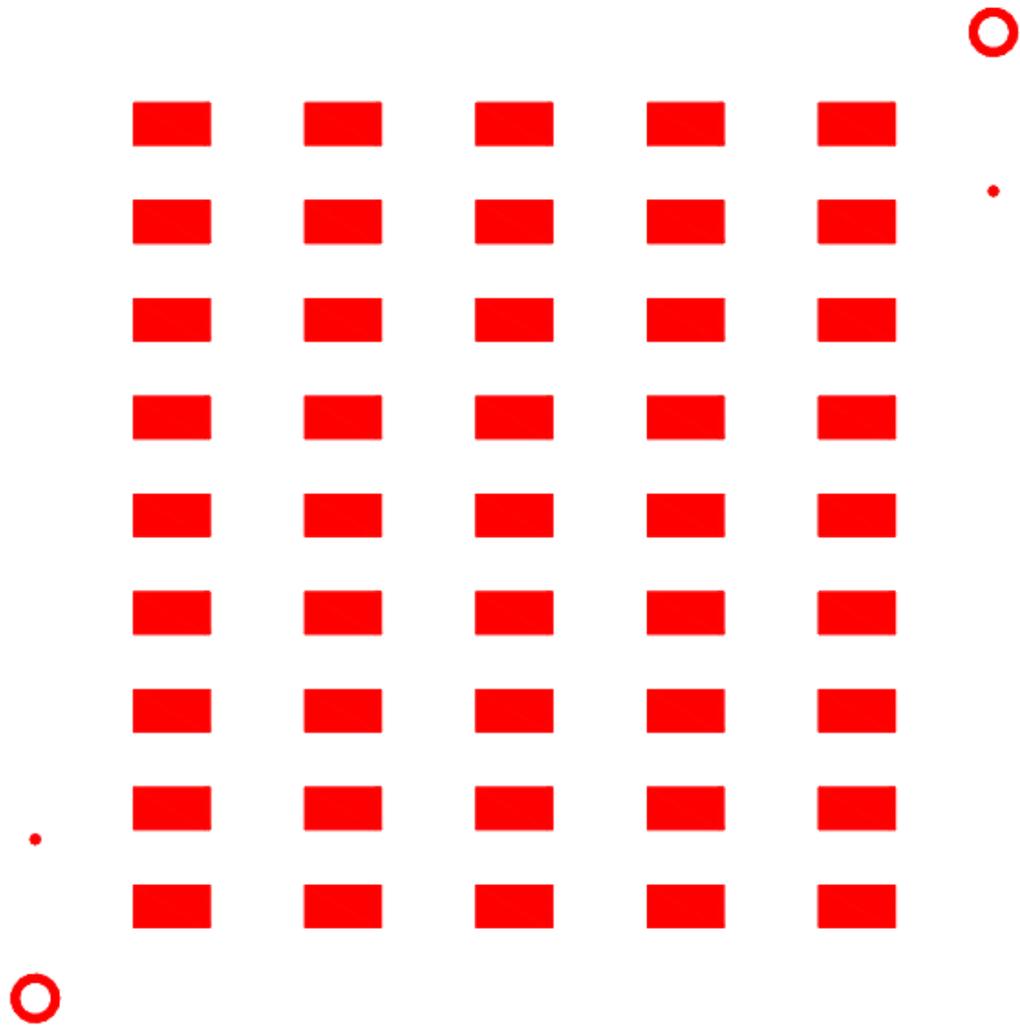
Capa de conductor frontal y trasero



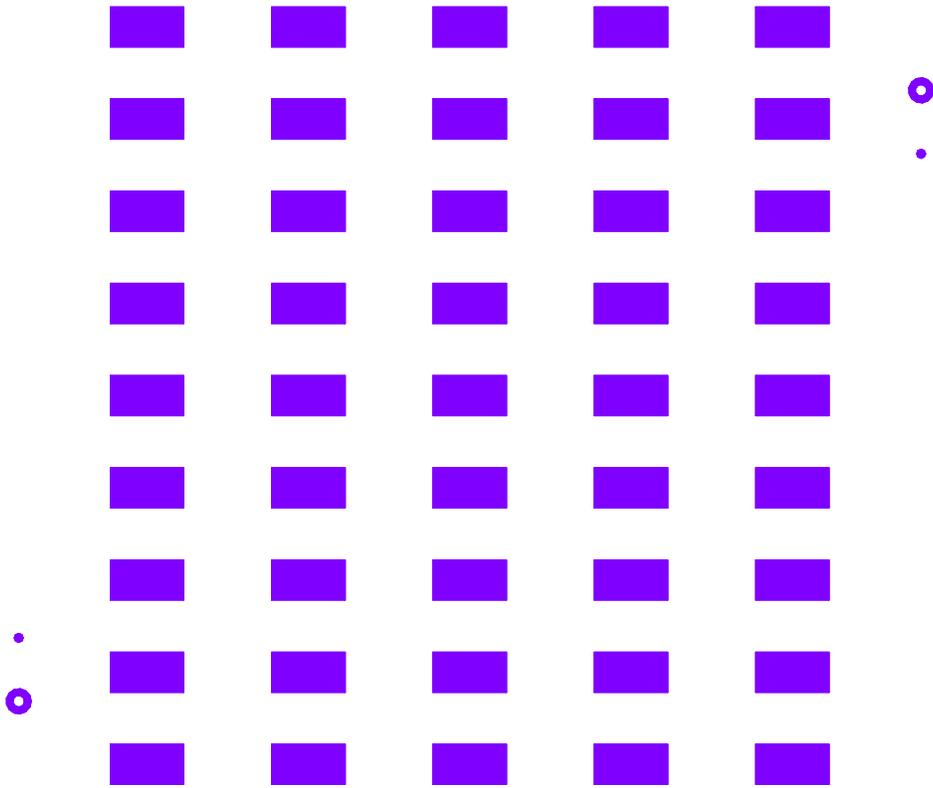
Capa de segundo conductor trasero



Capa de resistencia



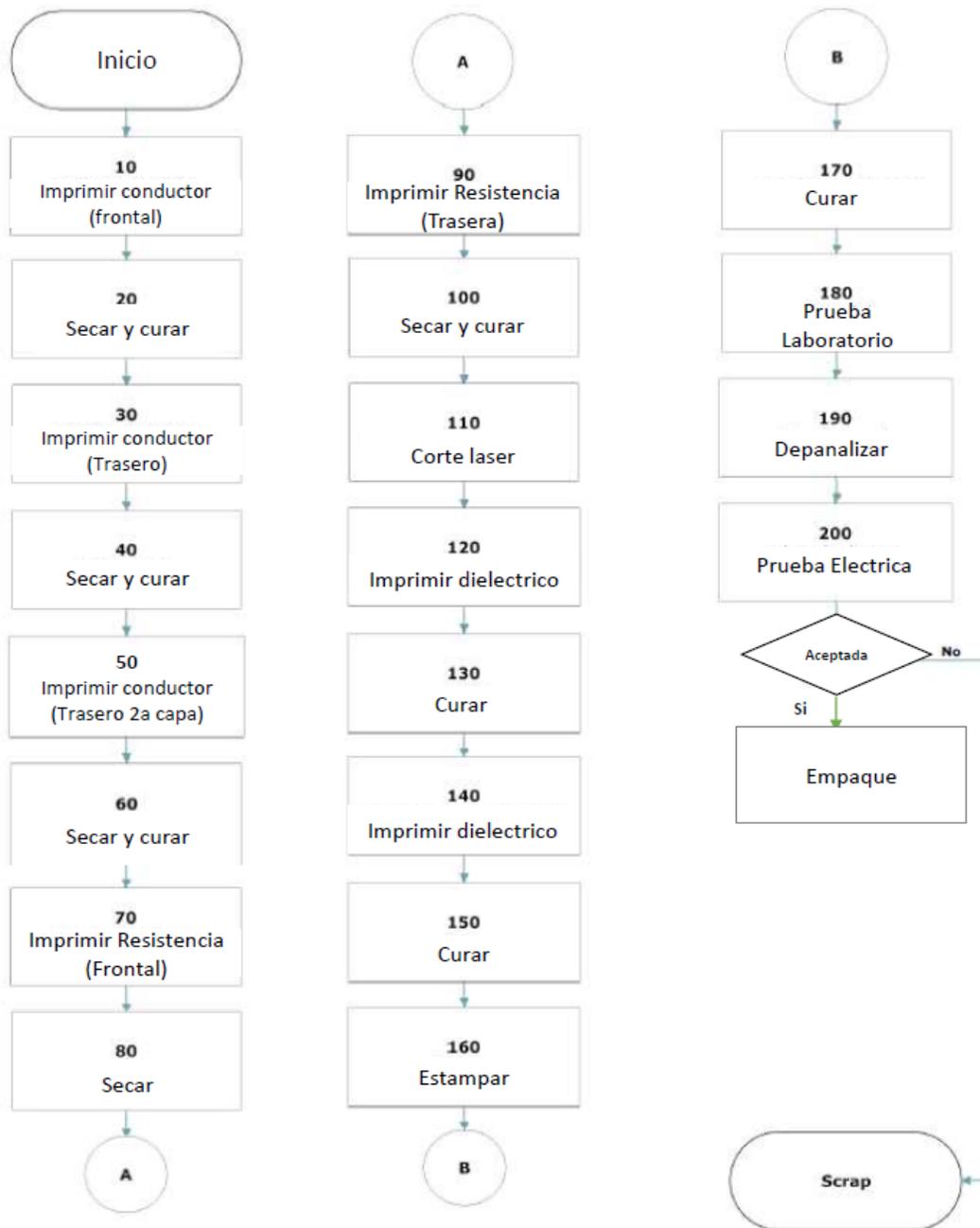
Capa de dieléctrico trasero y frontal



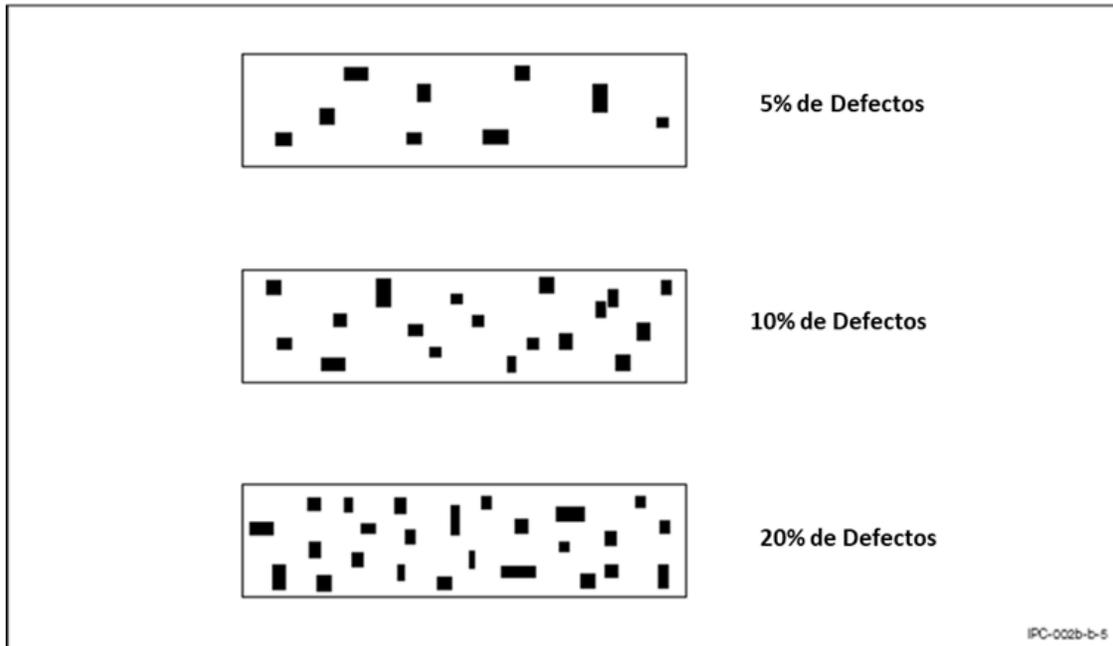
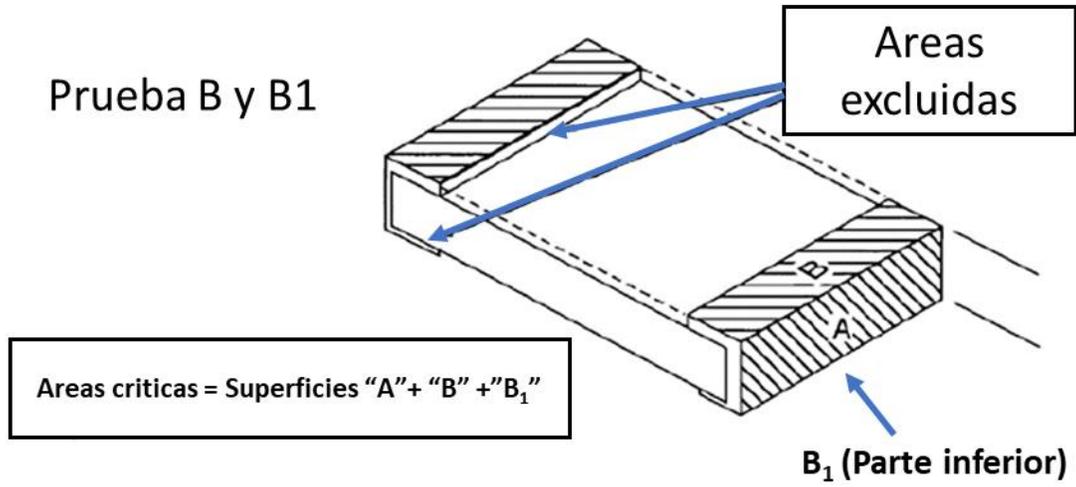
Capa de estampado

4K7JE
DATE CODE

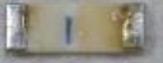
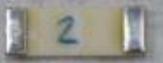
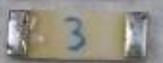
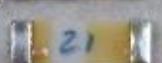
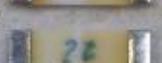
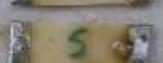
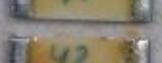
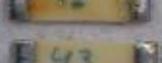
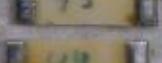
Anexo 3. Diagrama de flujo del proceso de resistencia 68156-4K7JE

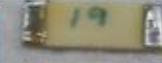
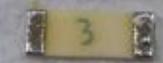
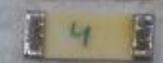
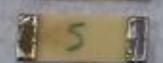
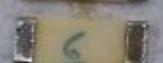
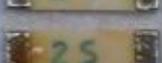
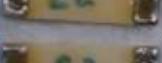


Anexo 4. Criterios de evaluación área de soldabilidad (Prueba B1)

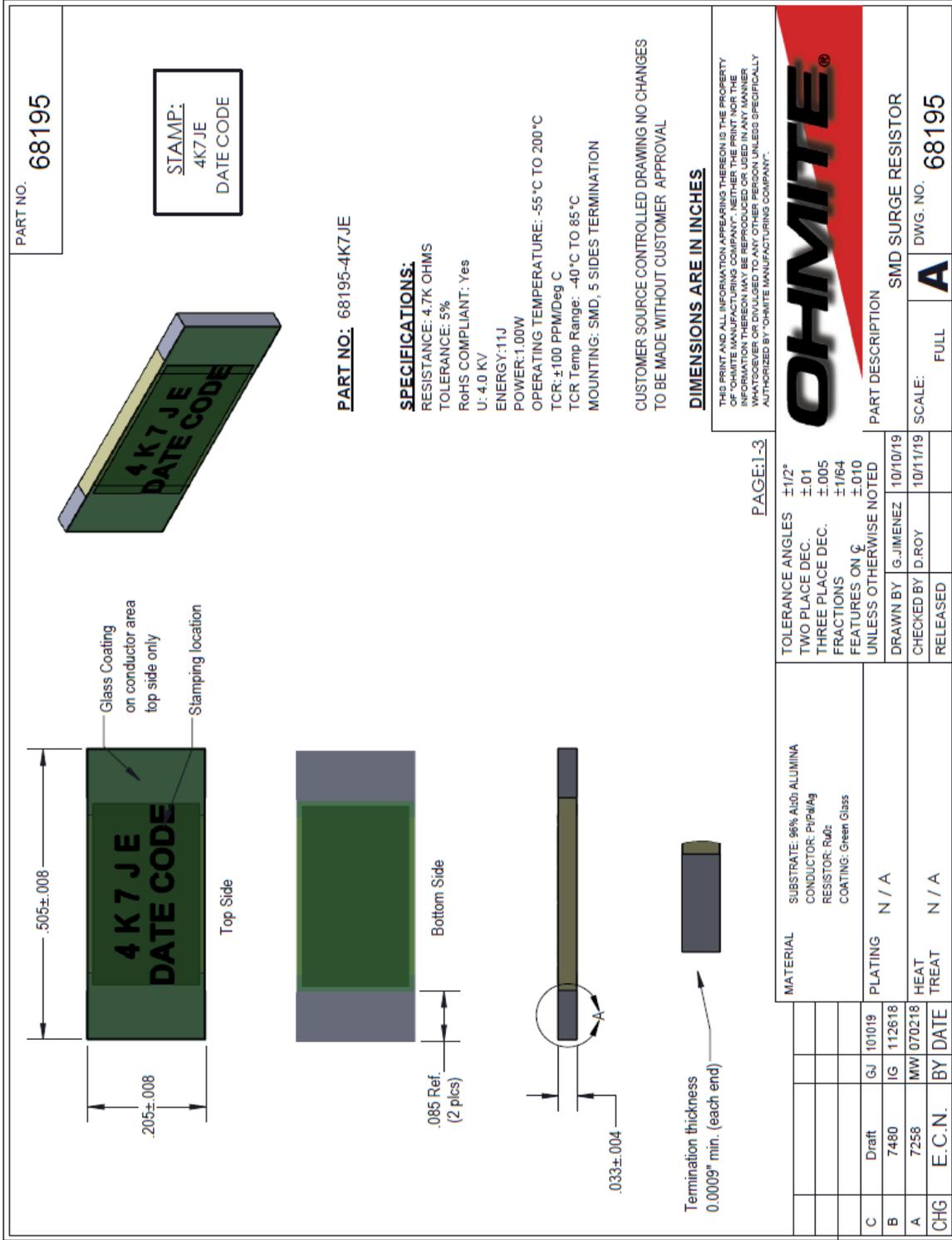


Anexo 5. Ejemplos de resultados para soldabilidad en base a diseño de experimentos

Soldabilidad en elementos con Grososres en quemado de 10-15 um								
Articulo	Aceptado / Rechazado	Fotografia de elemento	Articulo	Aceptado / Rechazado	Fotografia de elemento	Articulo	Aceptado / Rechazado	Fotografia de elemento
1	PASS		19	PASS		37	PASS	
2	PASS		20	PASS		38	PASS	
3	PASS		21	PASS		39	PASS	
4	PASS		22	PASS		40	PASS	
5	PASS		23	PASS		41	PASS	
6	PASS		24	PASS		42	PASS	
7	PASS		25	PASS		43	PASS	
8	PASS		26	PASS		44	PASS	
9	PASS		27	PASS		45	PASS	

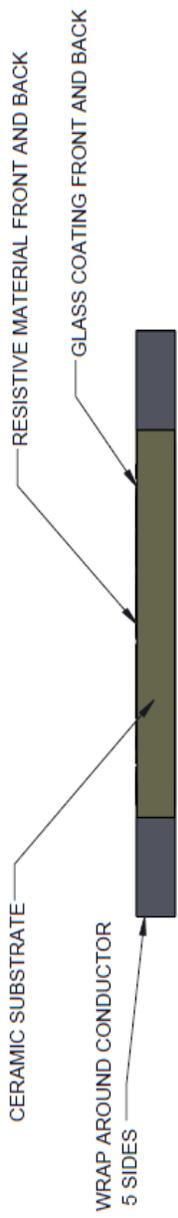
Soldabilidad en elementos con grososres en quemado de 25-30 um								
Articulo	Aceptado / Rechazado	Fotografia de elemento	Articulo	Aceptado / Rechazado	Fotografia de elemento	Articulo	Aceptado / Rechazado	Fotografia de elemento
1	FAILED		19	FAILED		37	FAILED	
2	FAILED		20	FAILED		38	FAILED	
3	FAILED		21	FAILED		39	FAILED	
4	FAILED		22	FAILED		40	FAILED	
5	FAILED		23	FAILED		41	FAILED	
6	FAILED		24	FAILED		42	FAILED	
7	FAILED		25	FAILED		43	FAILED	
8	FAILED		26	FAILED		44	FAILED	
9	FAILED		27	FAILED		45	FAILED	

Anexo 6. Modificación bajo nuevo número de parte 68195-4K7JE



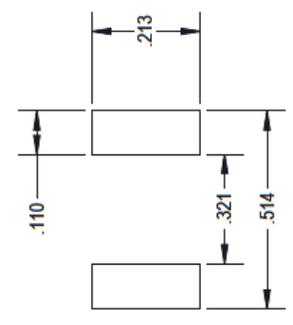
PART NO. **68195**

LAYER OVERVIEW



1. ELECTRICAL TESTING 100%
2. SOLDERABILITY TESTING
 - A. Run 5 samples from each manufacturing Lot.
 - B. All samples must pass the solder quality test using the temperature profile table on the right in accordance with IPC-A-610 Class 3

SOLDER PAD RECOMMENDATION:



Recommended solder profile J-STD-020C Fig. 5.1 except with the information in the table below.
 Recommended 10 mil stencil thickness.
 Recommended SAC305 solder alloy.

TEMPERATURE	Δt SECONDS
25 TO 150 °C	150 s \pm 5 s
150 TO 200 °C	125 s \pm 5 s
200 TO 221 °C	25 s \pm 5 s
221 TO 245 °C	30 s \pm 5 s
245 TO 100 °C	90 s \pm 5 s

customer source controlled drawing no changes to be made without customer approval

THIS PRINT AND ALL INFORMATION APPEARING THEREON IS THE PROPERTY OF "OHMITE MANUFACTURING COMPANY". NEITHER THE PRINT NOR THE INFORMATION THEREON MAY BE REPRODUCED OR USED IN ANY MANNER WHATSOEVER OR DIVULGED TO ANY OTHER PERSON UNLESS SPECIFICALLY AUTHORIZED BY "OHMITE MANUFACTURING COMPANY".

MATERIAL		N / A	
TOLERANCE ANGLES		$\pm 1/2^\circ$	
TWO PLACE DEC.		± 01	
THREE PLACE DEC.		± 005	
FRACTIONS		$\pm 1/64$	
FEATURES ON Q		± 010	
UNLESS OTHERWISE NOTED			
DRAWN BY	G. JIMENEZ	10/10/19	
CHECKED BY	D. ROY	10/11/19	
RELEASED			
PLATING		N / A	
C	Draft	GJ	101019
B	7480	IG	112618
A	7258	MW	070218
CHG	E.C.N.	BY	DATE
HEAT TREAT		N / A	
DIMENSIONS ARE IN INCHES PAGE:2-3			
PART DESCRIPTION		SMD SURGE RESISTOR	
SCALE:	FULL	DWG. NO.	68195



Anexo 7. Parámetros de impresión para resistencia 68195-4K7JE

		<h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1>								
AREA DE APLICACION:		Slimox : Physio					PAG.	1	DE:	1
DESCRIPCION DE LA HOJA DE PROCESO		Parámetros de Impresion para PN:68195-4K7JE					# CONTROL:	HP-SLI-043		
							FECHA ORIG:	18-Nov-19		
							FECHA:	18-Nov-19		
Impresion No.	1- Conductor Frontal	2- Conductor Trasero	3- Conductor Pull thru Frontal	4- Conductor Pull thru Trasero	5- Resistencia Frontal	6- Resistencia Trasera	7- Dielectrico Frontal	8- Dielectrico Trasero	9- Estampado	
Tipo de Tinta	Conductor	Conductor	Conductor Rebajado	Conductor Rebajado	Resistencia	Resistencia	Dielectrico	Dielectrico	Silicon Blanco	
Tipo de Impresion	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print-Flood	Print Flood	
Artwork Numero y Revision	68195 Rev B		68195 Rev B		68195 Rev B		68195 Rev B		68195 Rev B	
Pantalla Mesh/ Emulsion (Ref)	280-325 / 0.5 - 1.0		200-280 / 0.8 - 1.0		280 / 0.8-1.0 µm		325 / 0.8-1.0 µm	325 / 0.8-1.0 µm	255-40Y / 0.4 µm	
Tinta numero de parte	D99I200		D99I200 (Rebajada con Thinner I01-212 al 6%)		D99I236LB		D99I043		SM-962	
Grosor humedo (Ref)	35-37 µm	35-37 µm	25-35 µm	25-35 µm	35-38 µm	35-38 µm	35-40 µm (Incluyendo resistencia curada)	35-40 µm (Incluyendo resistencia curada)	N/A	
Grosor Secado (Ref)	20-24 µm	N/A	20-22 µm	N/A	20-22 µm	N/A	21-25 µm (Incluyendo resistencia curada)	N/A	N/A	
Grosor quemado (Ref)	N/A	10-15 µm	N/A	10-15 µm	N/A	10-15 µm	N/A	15-19 µm (Incluyendo resistencia curada)	N/A	
Secado (Temp / Tiempo)	150 (±5) °C de 10 a 15 min (Horno de caja)	N/A	150 (±5) °C de 10 a 15 min (Horno de caja)	N/A	150 (±5) °C de 10 a 15 min (Horno de caja)	N/A	150 (±5) °C 5-10 min (Horno de caja)	N/A	N/A	
Curado (Temp / Tiempo)	N/A	850°C por 10 min	N/A	850°C por 10 min	N/A	850°C por 10 min	N/A	600 a 625 °C de 2 a 4 min	150 (±5) °C de 30 a 60 min (Horno de caja)	
<p>Nota: Grosos en micras Thinner PN: I01-212 (DuPont 8250)</p>										