

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales
Maestría en Ingeniería y Gestión de la Calidad



Desarrollo de método para la mejora de la condición de soldadura en Componentes QFP para el cliente Mando

TRABAJO DE OBTENCIÓN DE GRADO

Presenta: **JEAN MANUEL ERIC ARÉVALO SANTERRE**

Tutor: Francisco Ernesto Navarrete Báez

Tlaquepaque, Jalisco. 6 de mayo de 2023.

Agradecimientos

A mi esposa Jazmín por acompañarme, amarme, aguantarme y entenderme durante todo el proceso.

A mis padres, Anne y Manuel por impulsarme a estudiar un posgrado.

A mi hermano Alex por escuchar.

A mi perro Blacky por comerse mi sofa.

Abstract

El trabajo presente evalúa la utilización de el análisis de regresión como una herramienta viable para generar modelos predictivos de desgaste de herramientas de impresión de pasta de soldadura (esténciles) utilizados en la industria electrónica. Para la generación del modelo fueron definidas variables dependientes: altura de impresión de pasta y desviación estándar entre paneles, independientes: cantidad de ciclos de impresión de pasta, variables excluidas del análisis: viscosidad de la pasta y condiciones ambientales.

Posterior a esto, los valores de altura de pasta de 41,000 paneles, así como la desviación estándar entre paneles fueron recolectados y procesados, con lo cual se generó un modelo de regresión inicial para ambas variables. Este modelo fue ajustado a través del uso del software Curve Expert y Minitab.

La interacción de ambos modelos fue evaluada de manera que fuera posible calcular un valor Z, el cual a su vez permitiría estimar un porcentaje de material no conforme en un punto dado del ciclo de vida del estencil. Finalmente, se realizó un ajuste al modelo para hacerlo práctico para el uso en la industria.

La efectividad de este modelo, así como la utilización de metodologías de calidad tales como el Diagrama de Ishikawa, y el uso de lecciones aprendidas, fue monitoreado mediante el análisis de la base de datos de scrap y reclamos de Continental, quedando demostrada una reducción significativa en los incidentes relacionados a soldadura defectuosa.

Palabras Clave:

Estencil, soldadura, regresión, scrap.

Índice

Desarrollo de método para la mejora de la condición de soldadura en Componentes QFP para el cliente Mando	6
1.- Fundamentación del trabajo	6
1.1.- Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación	6
1.2.- Análisis del contexto y escenario del objeto de estudio.	14
1.2.1.- Entorno del objeto de estudio.	14
1.2.2.- Descripción del escenario que se plantea investigar.	15
1.2.3.- Validación de las condiciones del escenario	17
1.3.- Objetivos de la investigación	17
1.4.- Relevancia y pertinencia del trabajo	19
2.- Marco conceptual de referencia.	20
2.1.-Estado de la cuestión.	21
2.1.1 Volumen de pasta en procesos Surface Mounting	21
2.1.1.2 Componentes Quad Flat Package (QFP)	22
2.1.2.- Análisis del modo de falla.	24
2.1.2.1.- Medición del problema	28
2.1.2.2.- Caracterización eléctrica	28
2.1.2.3.- Volumen de soldadura	31
2.1.2.4.- Análisis del problema	33
2.2.- Conceptos y enfoques teóricos relacionados.	43
3.- Marco Metodológico de referencia.	48
3.1.- Análisis de referencia: Primera hipótesis.	48
3.1.1.- Matriz de marco lógico del problema.	48
3.1.2.- Mapa de problemática.	49
3.1.3.- Diagrama de Causa-Efecto o Diagrama de Ishikawa	50
3.1.4.- Mapas de relaciones	54
3.2.- Definición preliminar de la metodología, selección de las herramientas requeridas y cronograma	54
3.3.- Metas de información	55
3.4.- Identificación, descripción y cuantificación de métricas iniciales	56
3.5.- Descripción del análisis: correlación e interpretación de la información sostenida	57

4.- Estrategia de investigación	58
4.1. Justificación de la estrategia de investigación	58
4.1.1 Consideraciones costo/beneficio de la estrategia	59
4.2.- Herramientas e instrumentos	59
4.3.- Etapas del proceso de aplicación/ investigación	61
4.3.1.- Cronograma de trabajo	65
4.3.2.- Imprevistos	66
5.- Exposición de hallazgos	68
5.1.- Organización de la información obtenida	68
5.1.1. Uso de Minitab para el modelo de altura promedio	80
5.1.2. Uso de Minitab para el modelo de desviación estándar promedio.	82
5.1.3. Integración de los modelos de altura promedio y desviación estándar promedio.	85
5.2.- Impacto de la estrategia en el objetivo de estudio	86
5.3.-Ajuste del modelo predictivo	86
6.- Discusión final	89
6.1.- Consecuencias de la aplicación de la estrategia	90
6.1.1.- Eliminación de los incidentes de cliente relacionados con soldadura defectuosa	97
6.1.2.- Reducción de scrap relacionado con fallas de soldadura	99
6.2.-Aspectos de la mejora para intervenciones subsecuentes	101
7.- Glosario	104
8.- Bibliografía	106

Desarrollo de método para la mejora de la condición de soldadura en Componentes QFP para el cliente Mando

1.- Fundamentación del trabajo

1.1.- Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación

Durante los últimos años, la división PSS (Passive Safety & Sensorics) de Continental La Tijera, ubicada en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, ha tratado de diversificar su mercado, el cual consiste principalmente en módulos de control de bolsas de aire, para abarcar la manufactura de módulos de distribución de frenado, bajo la modalidad “*build to print*”, es decir “la manufactura de equipos, componentes o productos de acuerdo con especificaciones exactas definidas por un cliente. Por lo general estas especificaciones se entregan como diseños generados por un representante del cliente.” (Smart Machine Technologies Inc., 2021).

Algunas de las bondades del modelo *build to print* es la de la reducción de los costos de desarrollo de un nuevo producto, ya que estos fueron cubiertos por el cliente, al mismo tiempo que acorta los ciclos de introducción de nuevos proyectos, ya que se aprovecha el saber hacer del proveedor de manufactura, concentrándolo meramente en la industrialización del producto.

Por otro lado, el *build to print* presenta las limitantes de que la propiedad intelectual, y en consecuencia la habilidad para hacer cambios de ingeniería en caso de creerse necesario no es propiedad de la localidad de manufactura, lo cual puede llevar a diseños estáticos. Finalmente, esta modalidad de manufactura presenta el reto de que las características de diseño del producto pueden no estar alineadas con las guías de

diseño de la localidad de manufactura, lo cual puede causar conflictos debido a choque de tolerancias y de técnicas de manufactura.

La diversificación de mercado hacia la manufactura de módulos de control de distribución de frenado ha sido definida por el corporativo de Continental como de vital importancia para PSS, ya que debido a la ubicación geográfica de planta La Tijera, se proyecta que esta localidad pudiera convertirse en el principal distribuidor de estos módulos de control en la región de Norteamérica.

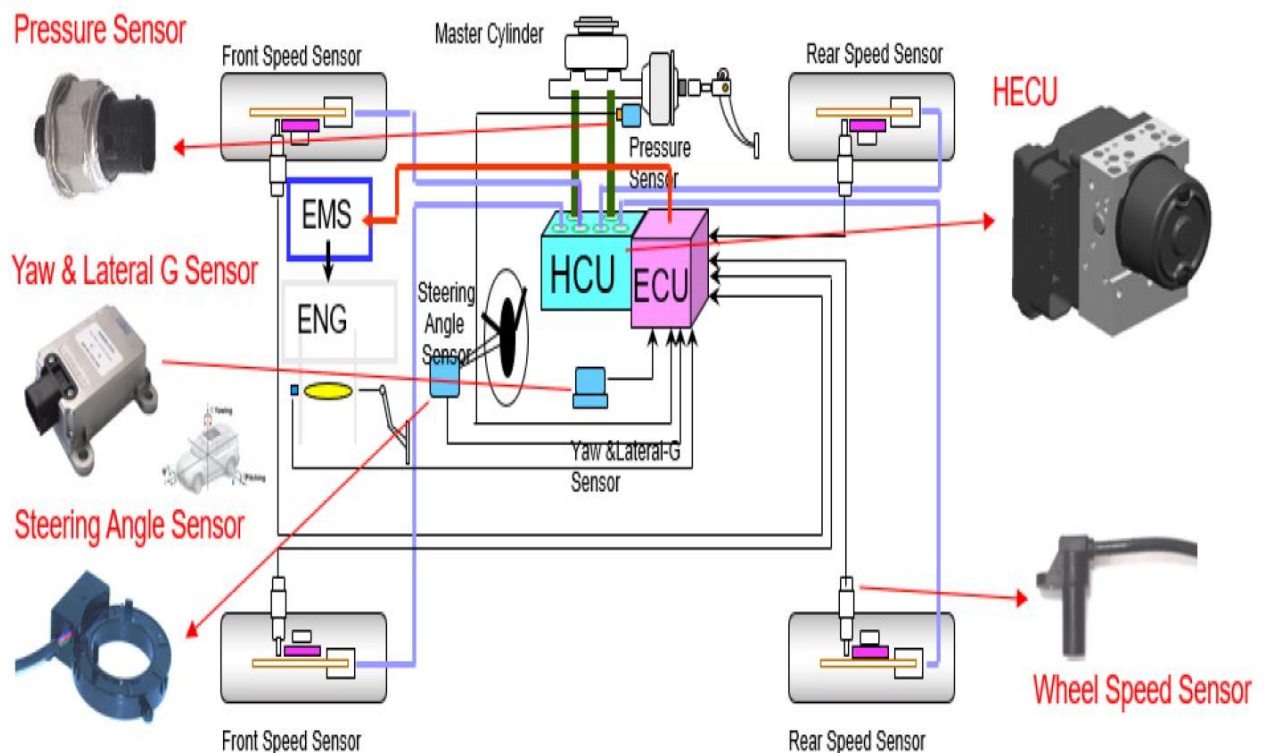


Imagen 1.1. Diagrama de funcionamiento de un Módulo de distribución de frenado (HECU)



Imagen 1.2. Módulo de distribución de líquido de frenado

Durante la industrialización y posterior lanzamiento a producción en serie de la plataforma Mando MGH100 ESC, primer proyecto de esta familia de módulos de distribución de frenado se ha notado problemas de llenado de pasta de soldadura debajo de componentes del tipo Quad Flat Package (QFP) con *thermal pad* expuesto (Imagen 1.1). Esta situación genera que el módulo de distribución de líquido de frenos se apague de manera momentánea durante la operación, lo cual pudiera llevar a un frenado no óptimo en caso de emergencia. Es importante mencionar que estos problemas son generados durante el ensamble de Surface-Mount Technology (SMT), el cual se define como “la técnica de manufactura electrónica en la que los componentes son ensamblados, utilizando máquinas automáticas, en la superficie del PCB.” (ESSO Electronic, 2022), en específico durante el proceso de impresión de pasta de soldadura. En la tabla 1.1 se provee una explicación detallada de los procesos estándar en un ensamble de tecnología SMT.



Standard QFP

Imagen 1.3. Empaquetado QFP estándar, con pad encapsulado



Exposed pad QFP

Imagen 1.4. Empaquetado QFP con pad expuesto- Este tipo de empaquetado es el que es susceptible de presentar insuficiencias de soldadura en pad.

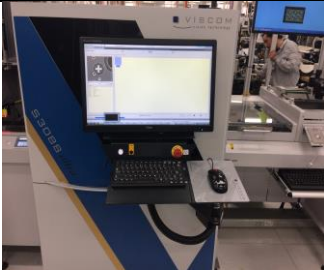
Paso del proceso	Fotografía del equipo	Concepto del proceso
1. - Marcado laser de PCB		Graba en el PCB un datamatrix con un número de serie irrepetible. Este número de serie se utiliza para cuestiones de trazabilidad a lo largo del proceso de manufactura.
2.- Impresión de pasta de soldadura		Deposita pasta de soldadura en el PCB a través de un estencil y un squeegee. El equipo cuenta con un sensor laser que monitorea la cantidad de pasta sin utilizar, alarmando al equipo cuando el nivel es demasiado bajo, esto evita insuficiencias de soldadura.
3.-Inspección de pasta de soldadura		Inspección automatizada de la pasta de soldadura a través de un ploteo en 3D de la superficie del PCB. Capaz de medir volumen y posición de pasta, así como cortos entre pines y partículas.
4.- Posicionamiento de componentes		Componentes electrónicos con colocado de manera automática a través de pipetas de vacío. Se cuenta con un sistema de escaneo de carretes antes de iniciar el proceso, asegurando el uso del componente correcto.
5.- Horno de reflujo		La pasta de soldadura es derretida a través de un horno. Monitoreo automático de las temperaturas por zona del horno. La velocidad a la que las PCB pasan a través del horno es controlada, asegurando el tiempo de exposición óptimo.
6 - Inspección óptica automática		Inspección automatizada a través de cámaras. Capaz de detectar presencia, polaridad y posición de componentes, así como cortos entre pines.

Tabla 1.1. Procesos estándar de ensamble SMT

Esta situación ha llevado a fallas intermitentes debido a estrés térmico en este tipo de componentes, debido que al no llenarse correctamente de pasta de soldadura el espacio entre el *thermal pad* y el *PCB*, no existe una unión de soldadura, por lo que el componente no es capaz de evacuar adecuadamente el calor generado durante la operación regular.

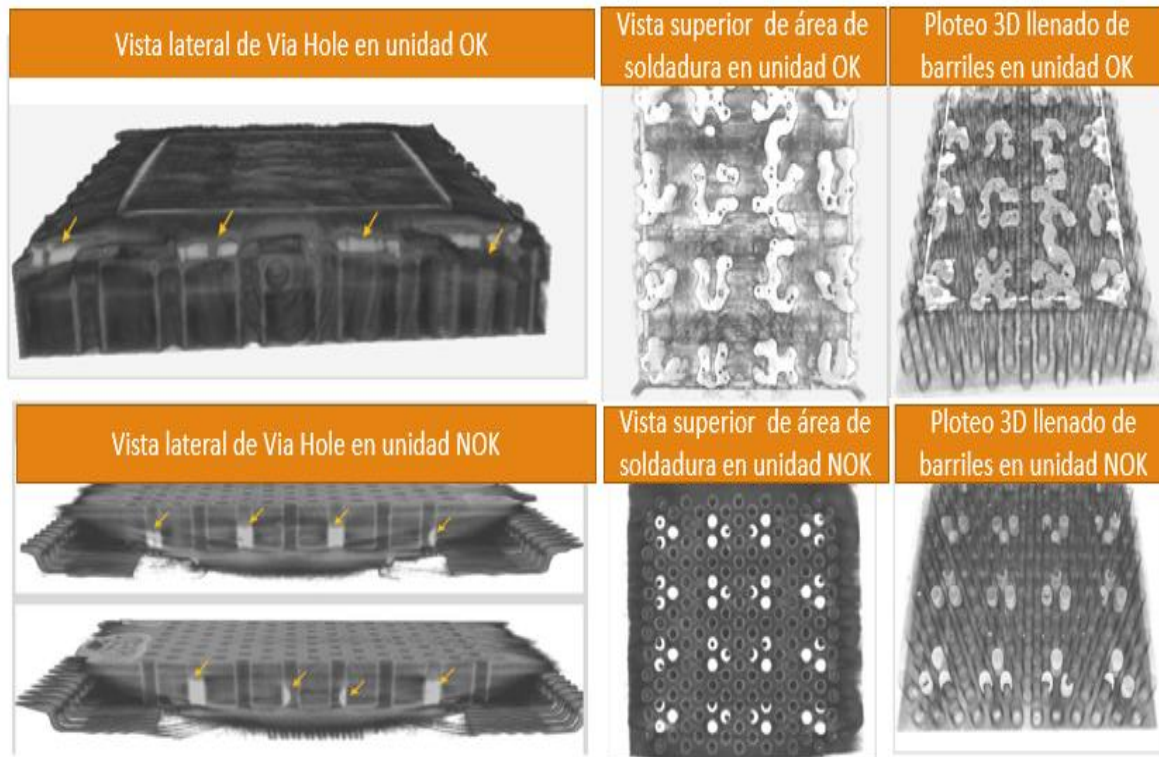


Imagen 1.5. Tomografía Computarizada: Unidad OK vs Unidad con llenado incorrecto.

Esta situación (imagen 1.3 a 1.5) afecta los resultados financieros de Continental La Tijera, por concepto de scrap y acciones de contención, las cuales consistieron en la inspección en rayos X de 200167 unidades, con un índice de rechazos del 0.054%, al mismo tiempo que pone en riesgo la seguridad del usuario final de los vehículos potencialmente afectados. Es importante mencionar que, con base en análisis previos, hemos notado que este modo de falla está íntimamente ligado al diseño del *PCB*, el cual debido a la modalidad en la cual se trabaja actualmente no puede ser rediseñado.

De igual manera, durante el análisis de causa raíz se encontraron factores adicionales que lleva a este modo de falla, notablemente la interacción entre el valor de *stand-off* del componente (altura del *thermal pad* del componente QFP contra el plano de impresión en el *PCB*), con el volumen de aplicación de pasta, ya que si bien, el volumen de aplicación de pasta está dentro de los límites establecidos en el equipo, la altura de la pasta no es la suficiente como para llenar el espacio entre la máscara de soldadura del *PCB* y el *pad* del componente. Esto resulta en la falta de unión inter metálica entre ambos. Cabe mencionar que los estándares técnicos de Continental consideran una inspección al 100% del volumen de aplicación de pasta, más no una inspección de altura de ésta.

Es importante mencionar que, durante el segundo cuatrimestre del año 2021, Continental la Tijera lanzó a producción en series una nueva plataforma de módulos de distribución de líquido de frenado bajo la familia MGH100: Mando MGH100 ESC MOCI, la cual, si bien tiene una distribución (topografía) distinta a nivel *PCB*, comparte características de diseño que la hacen susceptible al mismo tipo de modo de falla.

Las diferencias a nivel *PCB* entre ambas plataformas quedan ejemplificadas en las s imágenes 1.6 y 1.7 (ASIC afectado señalado en rojo).

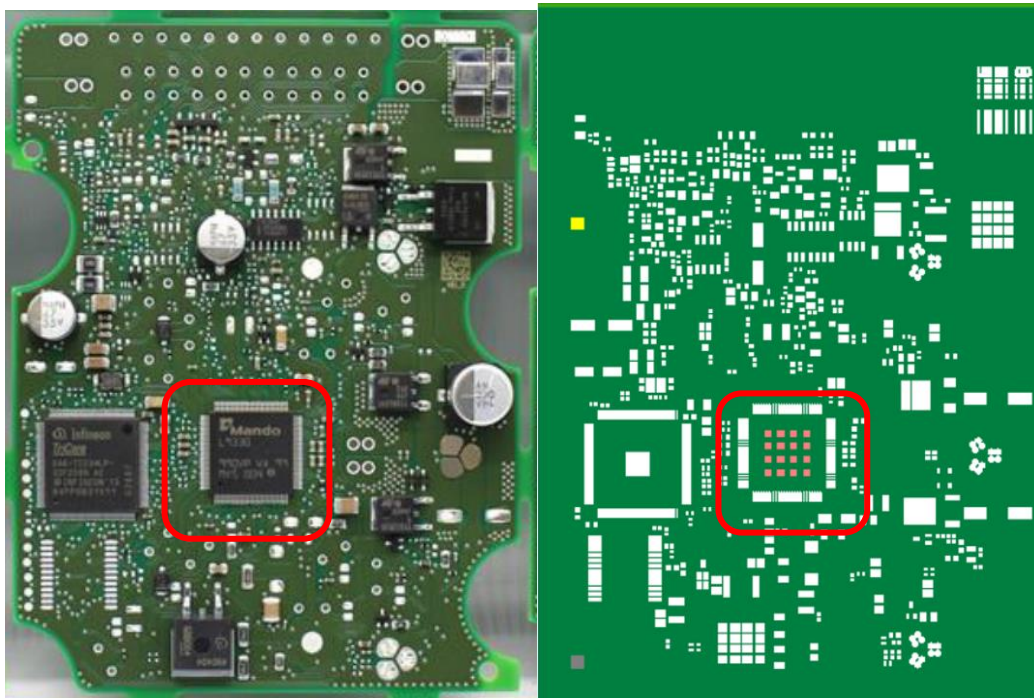


Imagen 1.6. PCB TOP side MGH100 ESC GEM, vista de tarjeta poblada (Izquierda) y distribución de máscaras de soldadura (derecha)

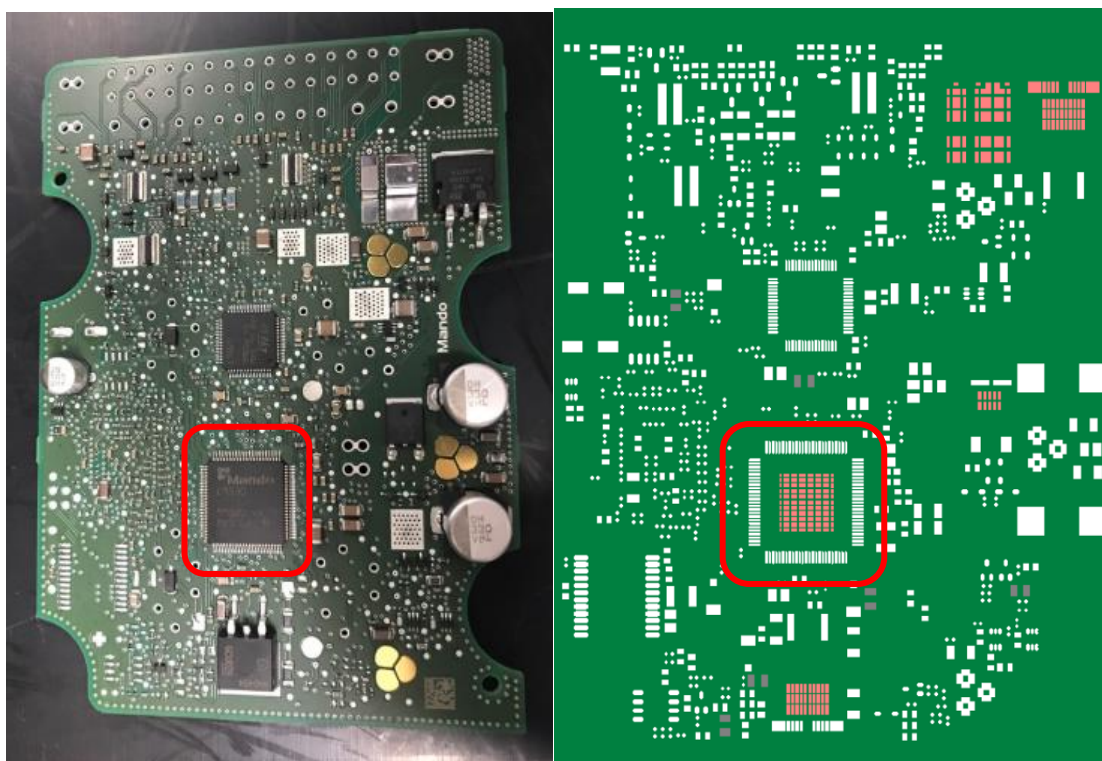


Imagen 1.7. PCB TOP side MGH100 ESC MOCI, vista de tarjeta poblada (Izquierda) y distribución de máscaras de soldadura (derecha)

Como podemos ver, estas áreas de oportunidad no solamente afectan los resultados financieros actuales de Continental La Tijera, presentando un reto para la viabilidad económica a largo plazo de los módulos de control de freno, sino que también comprometen la relación comercial entre Continental y Mando, afectando la asignación de nuevos proyectos.

Es debido a la importancia de estos proyectos, que el desarrollar un método la mejora de la condición de soldadura en componentes QFP resulta de suma importancia para la viabilidad económica de estos proyectos, logrando cumplir con los objetivos de calidad de Continental y Mando.

Finalmente, el lograr los objetivos propuestos en este documento, supondría el llegar a un ambiente de confianza mutua entre las partes interesadas, con lo cual se asegurará la nominación a nuevos proyectos.

1.2.- Análisis del contexto y escenario del objeto de estudio.

1.2.1.- Entorno del objeto de estudio.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la situación de los proyectos de la familia MGH100 es delicada debido a las siguientes razones:

- Los proyectos son fabricados bajo la modalidad *Build to print*, por lo cual el diseño de los componentes y materiales es estático. De igual manera, el cliente tiene el conocimiento técnico que aportaría a una resolución de fallas rápida y efectiva.
- Las guías de proceso de Continental (TST) no son aplicables al 100% a estos productos. (Continental Automotive AG, 2020)

- El equipo encargado de la industrialización de esta familia depende altamente del conocimiento empírico y de la prueba y error.

Esto ha resultado en que el proceso de industrialización y posterior producción en serie de estos productos esté plagado de problemas de calidad, los cuales han hecho que estos proyectos estén fuera de los métricos (KPI) de Continental en áreas como *scrap*, acciones de contención, embarques expeditados entre otros.

De igual manera, la falta de conocimiento técnico en estos productos ha llevado, en la opinión del autor, al sobre análisis y a la sobrerreacción por parte de las jefaturas y gerencias de Continental, por lo que el proceso para tomar acciones correctivas y/o realizar cambios de ingeniería que pudieran ser potencialmente benéficos para el proyecto se ha vuelto lento y burocrático.

1.2.2.- Descripción del escenario que se plantea investigar.

En la actualidad el conocimiento con el que cuenta Continental La Tijera sobre la interacción estencil- pasta de soldadura- componente QFP en los productos de la familia MGH100 es basado meramente empírico, ya que las características de diseño de PCB de estos productos no están alineadas con los TST (guías de diseño de procesos y producto de Continental). Por lo que no existe una noción clara de factores fundamentales para el mantenimiento de la calidad de estos productos, como puede ser el punto en el cual un estencil debe de ser remplazado, cuáles son las validaciones que, por procedimiento, deben de hacerse cada que se remplazan. De igual manera, buenas prácticas que deben de implementarse en proyectos de esta naturaleza, tal como la activación de la inspección de altura de pasta de soldadura, si bien están documentados, pueden resultar muy específicas y en consecuencia poco claras para

una persona que entra a estos proyectos y no tiene el contexto de las fallas que se han presentado hasta la fecha.

Con el fin expandir el conocimiento de Continental la Tijera cuenta sobre esta familia de productos, así como el de documentar y distribuir el conocimiento existente, el autor plantea enfocar la investigación a los siguientes puntos:

- Aprovechando las capacidades predictivas de los modelos de regresión, se buscará monitorear el comportamiento del volumen de pasta de soldadura aplicado por los estónciles de la familia MGH100. El autor propone hacer un promedio de los 10 valores más bajos (el fin de un espacio muestral de 10 unidades es el de identificar el valor promedio de los valores atípicos cargados hacia el límite inferior de especificación) en el componente QFP afectado para cada 5000 piezas producidas, los cuales serán modelados de manera periódica, hasta encontrar el punto en el cual los valores comienzan a tener una tendencia a la baja. Con esto se podrá determinar un punto de reorden para la compra y validación de nuevos estónciles, evitando que el volumen de pasta de soldadura en componentes QFP llegue a un nivel crítico en el que la calidad del producto final pueda verse afectada.
- Crear un manual que recopile el conocimiento técnico sobre la interacción del diseño de PCB de los productos de la familia MGH100 con la tecnología de Continental. El objetivo de este manual será el de documentar las acciones correctivas que se han implementado a la fecha, buenas prácticas y acciones de mejora, de manera que puedan aplicarse en proyectos con características de diseño similares y/o en proyectos de la familia MGH100 en otras localidades de Continental a nivel global.

1.2.3.- Validación de las condiciones del escenario

Con base en el análisis de causa raíz, se encontró que el modo de falla era causado por la combinación de un bajo volumen de pasta en conjunto con la disposición de los *via holes* del PCB, los cuales están colocados directamente en el área de impresión. Esto causa que la pasta, al no tener contacto con el *thermal pad* del componente, refluyera dentro de los *via holes*.

Las pruebas fueron realizadas en dos partes, en piso de producción, utilizando un osciloscopio para la caracterización eléctrica y en el laboratorio de calidad de Continental, donde se hicieron las microsecciones y análisis de rayos X.

Debido al impacto monetario por concepto de scrap y acciones de contención, la gerencia de calidad de Continental está de acuerdo con seguir con la investigación con el fin de lograr una mejora consistente en la condición de soldadura para las plataformas MGH100.

1.3.- Objetivos de la investigación

Objetivo general

- Desarrollar una metodología de calidad que permita el mantenimiento, a lo largo del ciclo de vida de los proyectos de la familia MGH100, del volumen de impresión de pasta con lo que se busca asegurar el correcto llenado de la parte inferior de los componentes QFP de manera independiente al diseño del *PCB*.

Objetivos particulares

- Desarrollar un manual de procedimiento que permita asegurar la calidad de la unión de soldadura en componentes QFP para los productos del cliente Mando.
- A través de este manual, reducir la incidencia de rechazos relacionados con soldadura defectuosa en durante la fase de industrialización y *ramp-up* de los productos del cliente Mando.
- Integrar el método de calidad propuesto dentro del sistema de gestión de la calidad de continental, de manera que pueda ser aplicado en introducciones subsiguientes y/o en otras localidades de Continental.
- Desarrollar un modelo de regresión que permita predecir el volumen de impresión de pasta en función del desgaste de herramientas, de modo que los herramientas puedan ser reemplazados de manera preventiva.
- Cuantificar el impacto del modelo de mantenimiento de impresión de pasta, mediante el monitoreo del *scrap* y los reclamos de cliente relacionados a soldadura defectuosa.

Alcance

Este proyecto de investigación se acota a los proyectos del cliente Mando, esto es con base a los siguientes factores:

- Todos los proyectos de este cliente se manufacturan en la modalidad "*Build to print*" lo cual significa que el diseño del *PCB* no puede ser modificado
- Las *PCBs* de los proyectos de Mando tienen la particularidad de tener secciones completamente cubiertas por Via Holes, a diferencia de los diseños de *PCB* de Continental, en las cuales las secciones con Via Holes en ellas tienen secciones sin orificios con el fin de evitar filtraciones de soldadura

- Las *PCBs* de los proyectos de Mando no se adecuan a los estándares técnicos de Continental (TST) por lo que las modificaciones al proceso y/o herramental no pueden ejecutarse sin un análisis previo
- El impacto de la implementación del modelo debe de ser cuantificable, tanto en el ámbito del *scrap* (evaluado como una reducción en el costo mensual de este concepto), como en el ámbito del número de reclamos debido a soldadura defectuosa, evaluado contra las metas internas, en PPM (Partes por millón), de Continental La Tijera.

1.4.- Relevancia y pertinencia del trabajo.

En la opinión del autor, de tener resultados favorables, el desarrollo de los modelos de mantenimiento de volumen de pasta de soldadura, así como la documentación del manual de aseguramiento de la calidad para los proyectos de la familia MGH100 permitirá, en primer lugar, asegurar la viabilidad económica a largo plazo de estos productos.

De igual manera, estos modelos facilitarán la introducción de nuevas plataformas con características similares (incluso para otros clientes), haciendo más ágil la industrialización de estas, aportando al objetivo de la división PSS de Continental de diversificar su cartera de productos para el mercado de Norteamérica, logrando posicionarse como el fabricante líder de módulos de control de líquido de frenos en la región.

2.- Marco conceptual de referencia.

2.1.-Estado de la cuestión.

Con el fin de hacer la lectura de este trabajo lo más entendible posible, el estado de la cuestión se dividirá en dos secciones, primeramente, los antecedentes técnicos de la importancia del volumen de pasta de soldadura en procesos *Surface mounting*, seguido por el análisis de modo de falla presentado en la plataforma MGH100 ESC GEM y la explicación de por qué este pudiera presentarse en la plataforma MGH100 MOCI.

2.1.1 Volumen de pasta en procesos Surface Mounting

Debido a la necesidad de integrar productos con funciones complejas en paquetes cada vez más pequeños, durante las últimas dos décadas la industria electrónica ha migrado sus métodos de manufactura de tecnología *through hole* (TH), en el cual los componentes electrónicos se pasan a través del PCB a tecnología Surface Mounting (SM). (Texas Instruments, 2013, pág. 3).

Una parte fundamental en la migración de tecnología TH a SM es el desarrollo de componentes del tipo Chip Scale Package (CSP), es decir, componentes que combinan una alta capacidad de procesamiento, en un paquete de dimensiones reducidas. Los componentes CSP tienen la particularidad de tener una distancia entre pines (pitch) de 0.015", lo cual hace que el fabricante de equipos que utilicen este tipo de empaquetado deba de ser sumamente cuidadoso con la preparación de los herramentales y materiales utilizados en la impresión de pasta de soldadura, con el fin de evitar cortocircuitos, así como como problemas en campo debido a la calidad de la unión inter metálica de soldadura entre PCB y componente.

Durante el desarrollo de la tecnología SM, se ha encontrado que el volumen de pasta de soldadura depositado en los pads del PCB, en conjunto con la altura libre del pad de soldadura del componente (Stand-off) y el tamaño del pad son los principales contribuidores en la calidad de la unión inter metálica a largo plazo. (Santos & Mohanty, 2007, pág. 1). Para el caso de la plataforma MGH100, debido a la modalidad “*Build to Print*” del producto, tanto el stand-off como el tamaño del pad no pueden ser modificados, por lo que el resto de la investigación se centrará en el volumen de pasta de soldadura.

En tecnología SM, la pasta de soldadura se aplica mediante un proceso de impresión, en el cual se utiliza una plantilla (esténcil) con aperturas que corresponden al área de soldadura de la PCB. Estudios han demostrado que “para estenciles fabricados con corte laser, una apertura con un nivel alto de conicidad, en conjunto con un nivel alto de electro pulido, mejorarán el desempeño del esténcil” (Santos & Mohanty, 2007, pág. 9).

De igual manera, se ha encontrado que la forma de la apertura y la posición de la misma contra el sentido de impresión tiene un efecto en el volumen depositado, con aperturas perpendiculares presentando un volumen 9% mayor a aperturas paralelas con la misma área de impresión. (Pan, Tonkay, Storer, Sallade, & Leandri, 1999)

Factores adicionales que contribuyen al volumen de pasta de soldadura es el grosor del esténcil, así como los parámetros de impresión, descritos a continuación:

- Presión del squeegee
- Velocidad del squeegee
- Altura de separación (después de la impresión)

- Velocidad de separación
- Intervalo de limpieza

El estándar de la industria electrónica automotriz es definir los parámetros de impresión con base en un diseño de experimentos (DOE), el cual provee una metodología sistemática y eficiente para la optimización de parámetros, la utilización de DOE ha permitido lograr mejoras de hasta 20% en el volumen de pasta. (Gopal, Rohani, Yusof, & Bakar, 2006, pág. 19).

2.1.1.2 Componentes Quad Flat Package (QFP)

La plataforma MGH100 cuenta con dos microcontroladores con un empaquetado del tipo Quad Flat Package (QFP), los cuales se encargan del procesamiento de señales provenientes de sensores en el vehículo, así como de la activación de un arreglo de válvulas hidráulicas, las cuales distribuyen el líquido de frenos.

Los componentes QFP tienen dos tipos de empaquetados: Standard y con pad expuesto. Los dos microcontroladores de MGH100 son del tipo pad expuesto. El propósito del empaquetado de pad expuesto es el disipar el calor generado por la operación del componente, así como el de proveer una tierra física. La intención de diseño de esta configuración es el PCB actúe como disipador de calor, a través de la unión inter metálica entre el pad del componente y el pad del PCB (NXP, 2019).



Standard QFP

Imagen 2.1. Empaquetado QFP estándar, con pad encapsulado



Exposed pad QFP

Imagen 2.2. Empaquetado QFP con pad expuesto- Este tipo de empaquetado es el que es susceptible de presentar insuficiencias de soldadura en pad.

En componentes QFP con pad expuesto, la utilización de vías termales (agujeros en el PCB que actúan como tubos para la evacuación del calor) es necesaria. De igual manera, con el fin de evitar filtración de soldadura en las vías termales, se recomienda la implementación de una máscara de soldadura en el PCB, la cual asegurará que, durante el reflujo la pasta de soldadura se mantenga en un área controlada.

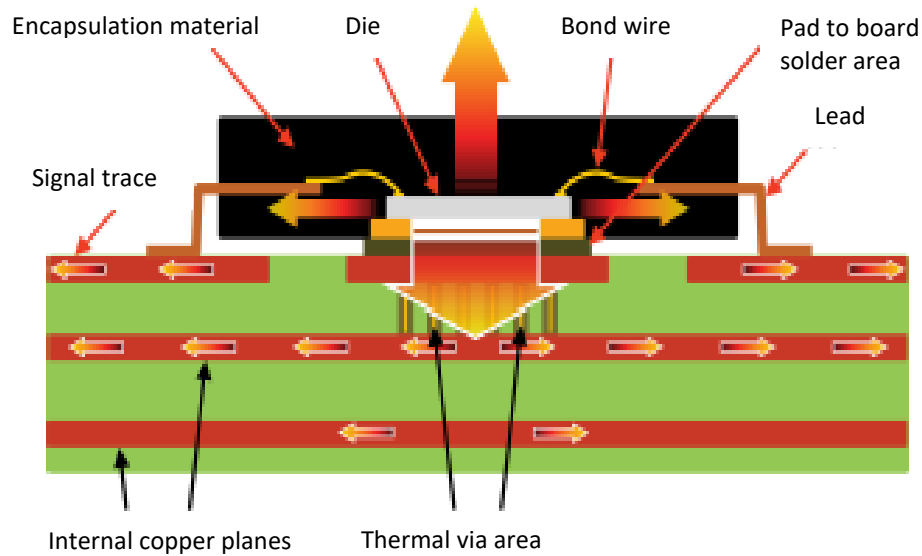


Imagen 2.3. Diagrama de transferencia térmica

Para empaquetados QFP con pad expuesto, existe un consenso de que el grosor del estencil debe de definirse con base al pitch y stand- off del componente, con grosores en el rango de los 0.1 a 0.15 mm siendo el estándar de la industria (Imágenes 2.1 a 2.3).

2.1.2.- Análisis del modo de falla.

El proyecto presentado en este documento surge de un reclamo de cliente, en el cual se notificó la falla de 53 módulos de control de sistema ABS. La falla reportada es la no comunicación CAN entre el módulo y el vehículo durante la prueba DVT (Dynamic Vehicle Test), en la línea de ensamble del cliente. Realizando un análisis de rayos X en dos unidades retornadas a Continental, se encontró un patrón de puntos negros debajo del componente encargado de la comunicación CAN. El componente en cuestión es un microcontrolador QFP con thermal pad expuesto (imagen 2.4).

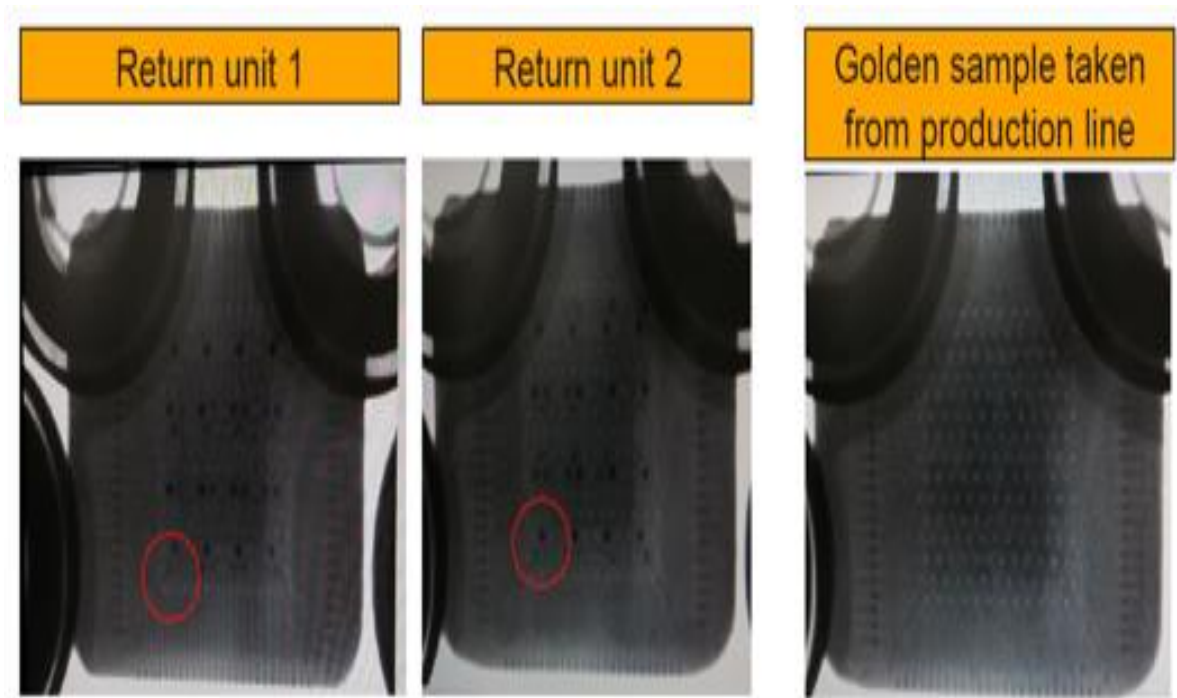


Imagen 2.4. Puntos negros en QFP

Con el fin de encontrar la causa de los puntos negros, se realizó una tomografía computarizada, así como pruebas de penetración de tinta. Con base a estos análisis se encontró que la pasta de soldadura había refluído dentro del vía termal, generando un área de contacto reducida entre el pad del componente afectado y el área de soldadura del PCB. Esto genera sobrecalentamiento en el componente durante la realización de la prueba DVT, lo cual resulta en la activación de un comando de Reset en el componente, por lo que se pierde la comunicación CAN de manera intermitente.

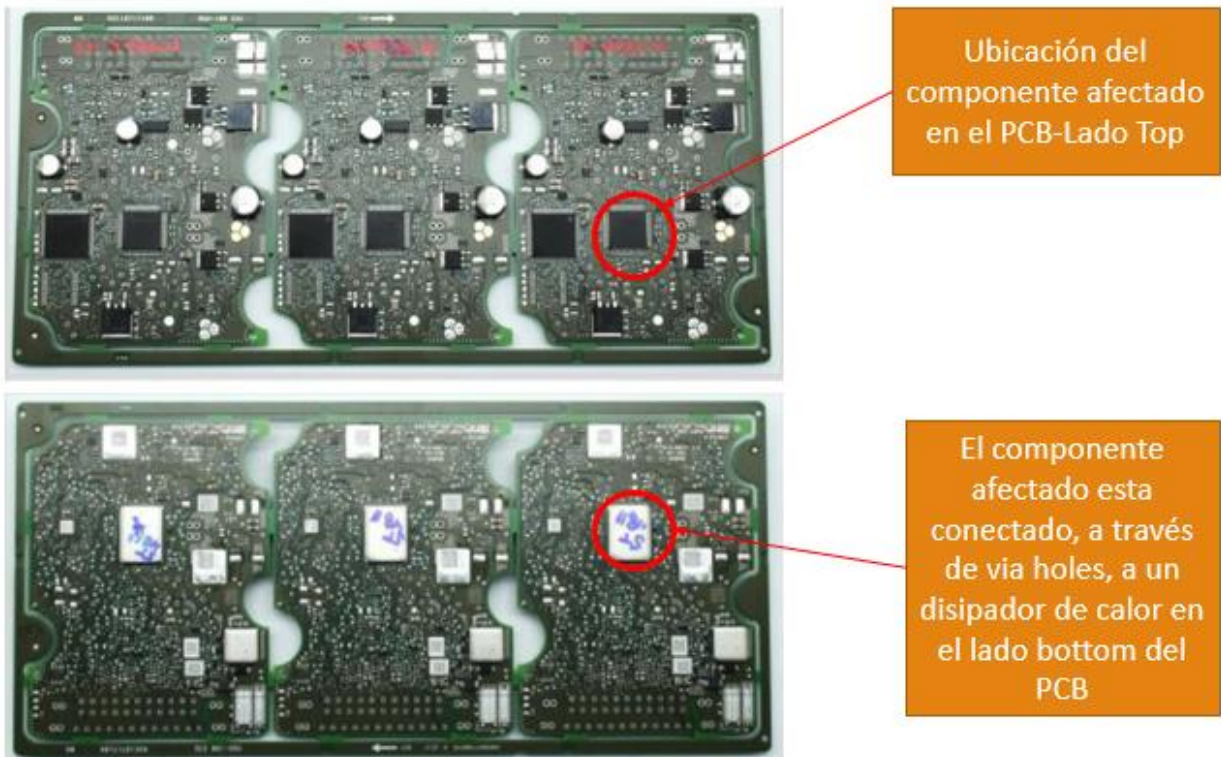


Imagen 2.6. Ubicación del componente afectado

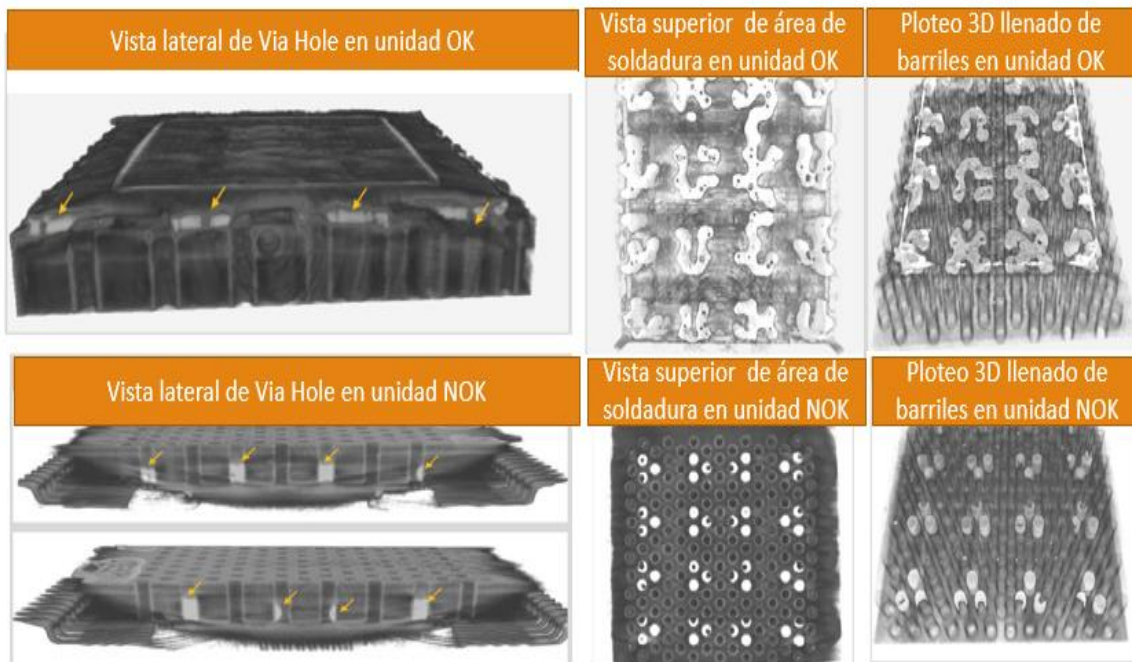


Imagen 2.7. Tomografía Computarizada



Imagen 2.8. Prueba de penetración de tinta

Debido al modo de falla, Continental realiza un análisis de rayos X al 100%, tanto en la planta de Guadalajara como en la planta del cliente, ubicada en Limeira, Brasil. El costo del análisis, por unidad, es de 1.17 USD.

Por la situación antes mencionada, Continental busca mejorar la condición de soldadura debajo del pad del componente afectado, eliminando la filtración de soldadura en vía termal. De igual manera, se busca establecer medidas sistémicas que prevengan la ocurrencia de este modo de falla en futuros proyectos. Finalmente, se busca probar la confiabilidad de las unidades afectadas, logrando que las unidades que presentan puntos negros sean aceptadas para producción en series por el cliente final.

2.1.2.1.- Medición del problema

La medición del problema en cuestión se dividió en dos áreas: La caracterización eléctrica de la falla (con fines de evaluar la confiabilidad de las unidades afectadas con base en el número de puntos de filtración de soldadura), así como el análisis del volumen de soldadura a lo largo del ciclo de vida del producto.

2.1.2.1.2.- Caracterización eléctrica

Con el fin de entender el efecto de la condición de soldadura faltante debajo del pad del componente afectado, se realizaron muestras con un volumen de soldadura del 100%, 50% y 0% en el área sospechosa. La temperatura del componente afectado se midió con un termopar, mientras que los pulsos de voltaje de este se medían con un osciloscopio (nota: Los límites de volumen de pasta, definidos por continental, van del 70% al 200% del volumen nominal de la soldadura). Los resultados de este análisis mostraron que solamente la muestra con 0% de volumen de pasta presentaba una pérdida de comunicación.

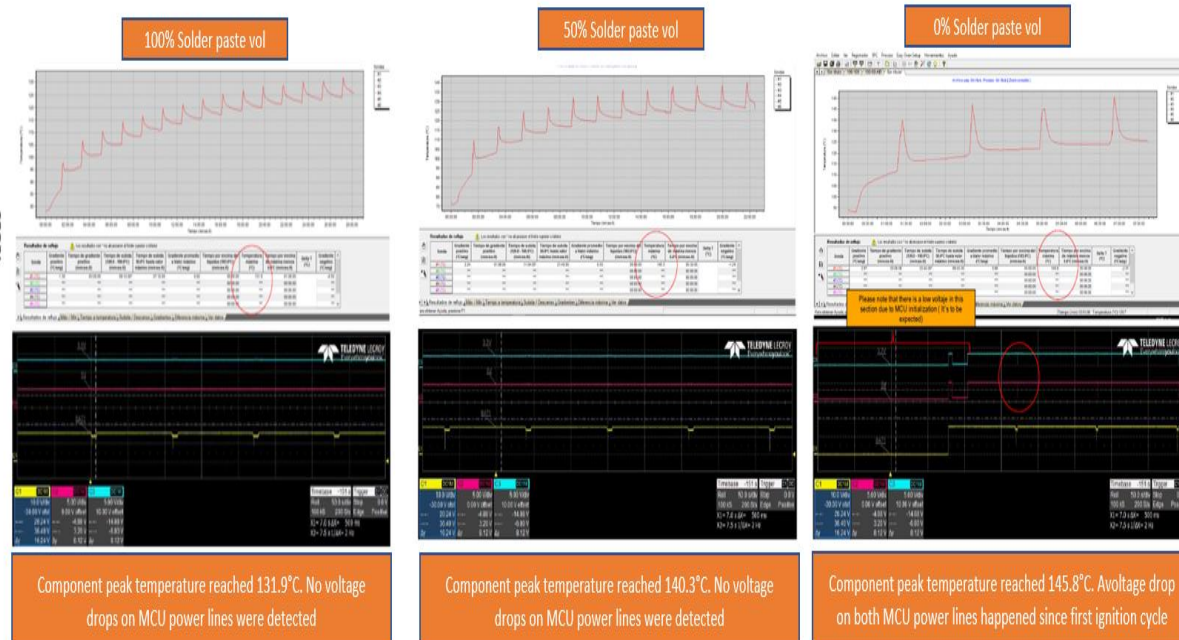


Imagen 2.9. Caracterización eléctrica de la falla- En esta imagen puede verse como al llegar a un 0% de volumen de pasta (no conexión eléctrica) la señal del componente QFP se interrumpe, lo cual es una medida de protección del mismo ante sobrecalentamiento, con el fin de evitar un daño permanente.

Como parte de la caracterización de la falla, se decidió generar muestras con volúmenes de aplicación de pasta entre el 0% (Nivel en el que se sabe que ocurre la falla reportada por el cliente) y el 50% (Nivel en el que se sabe que la falla reportada por el cliente no ocurrirá). Las muestras generadas, así como los resultados de las mediciones se muestran en la tabla 2.1. Ninguna de las muestras presentó una pérdida de comunicación.

Number of open stencil appertures (out of 16)	Solder paste level on ASIC Thermal pad	Peak Temp on ASIC
1	6.25%	157.3
2	12.50%	151.8
3	18.75%	145
4	25%	149
5	31.20%	138.8
6	37.50%	136.3
7	43.75%	136.3

Tabla 2.1. Caracterización eléctrica de la falla 2

Con base en este análisis fue posible establecer una correlación inversa entre el nivel de pasta de soldadura en el área de pad del componente afectado y la temperatura pico de éste (a mayor nivel de pasta de soldadura menor será la temperatura pico del componente).

Como una acción adicional proveniente de este estudio, se decidió hacer pruebas de confiabilidad en unidades con distintos niveles de afectación, simulando la fatiga de materiales proyectada a 10 años de uso en condiciones normales. La distribución de las muestras se explica en la siguiente tabla.

No. of black dots (Max 16 black dots)	No. Of units
0	3
4	3
6	3
8	4
10	2
12	2
14	1

Tabla 2.2. Muestreo para prueba de confiabilidad

2.1.2.3.- Volumen de soldadura

Con el fin de encontrar una posible causa para la falla reportada por el cliente, se consultaron los registros de aplicación de pasta en el área del pad para el componente afectado. Las fallas (53 unidades en total) fueron fabricadas en un periodo entre el 15 de diciembre 2019 y el 3 de enero 2020. El espacio muestral para la recolección de datos se hizo desde octubre 2019 hasta junio 2020. La población de datos analizados fue la siguiente: 123312.

Raw data producción octubre 2019 a junio 2020

Month	Index	Thermal-Pads
Oct	8114	2,528,440,218
Oct	8114	2,458,541,984
Oct	8114	2,417,232,018
Oct	8115	2,445,533,667
Oct	8115	2,499,919,190
Oct	8115	2,349,357,348
Oct	8116	2,839,475,495
Oct	8116	2,765,654,148
Oct	8116	2,683,269,677
Oct	8117	2,390,960,210
Oct	8117	2,317,740,277
Oct	8117	2,285,568,320
Oct	8118	2,509,456,721
Oct	8118	2,531,181,501
Oct	8118	2,406,326,820

Unidad de medida para el
volumen: micrómetros
cúbicos

Registro de volumen de las unidades reportadas por
cliente

PCB Posit [™]	Serial Num	Date (YYY,mm,dd)	Thermal Pads Volumen um ³
1	193535016319121500341	2019,12,15	1,982,434,732
2	193535016319121500342	2019,12,15	1,911,585,914
3	193535016319121500343	2019,12,15	1,862,629,853
1	193535016319121500331	2019,12,15	1,914,795,885
1	193535016319121501241	2019,12,15	1,920,761,253
3	193535016319121501263	2019,12,15	1,989,525,542
1	193535016319121501291	2019,12,15	1,821,785,242
3	193535016319121501293	2019,12,15	1,821,785,242
1	193535016319121803381	2019,12,18	1,826,938,425
1	193535016319121501311	2019,12,15	1,913,919,201
3	193535034319121600073	2019,12,16	1,759,479,674
1	193535034319121600091	2019,12,16	1,888,390,265
1	193535034319121600191	2019,12,16	1,823,162,097
1	193535034319121600201	2019,12,16	2,026,442,059
1	193535034319121600211	2019,12,16	1,923,706,903
2	193535034319121600362	2019,12,16	1,994,101,197
1	193535034319121600381	2019,12,16	1,853,335,026

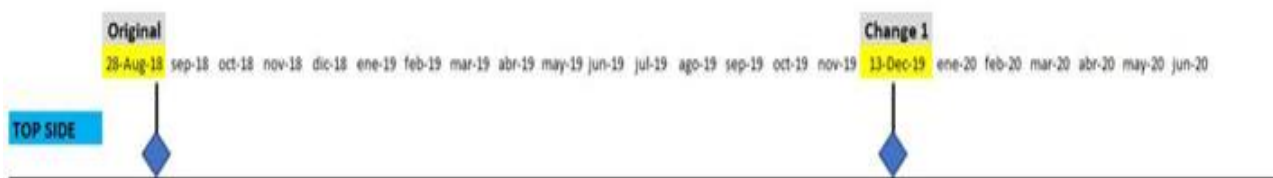
Tabla 2.3. Comparación de volúmenes de soldadura

Durante la comparación de volúmenes de soldadura, fue posible observar que el volumen de pasta en las unidades defectuosas era menor que el de la producción regular, sin embargo, el volumen no era del 0%, como fue encontrado durante la caracterización eléctrica.

2.1.2.4.- Análisis del problema

El análisis de los volúmenes de soldadura indicó un cambio en el volumen de pasta después del 15 de diciembre de 2019. El historial de modificaciones de parámetros de impresión de pasta fue analizado, no se encontró evidencia de modificación alguna. De igual manera, se validó que la pasta de soldadura no había tenido cambios en su composición química desde el inicio de la producción. De esta manera, la causa raíz de la falla pudo aislarse a un cambio en el grosor del estencil.

Un análisis en el historial de cambios de este herramental reveló que el 13 de diciembre de 2019, se introdujo un estencil con un grosor de 0.1mm, mientras que el estencil original tenía un grosor de 0.125 mm. El cambio del estencil fue generado debido a que el estencil original había llegado al límite de su vida útil. Durante el periodo de manufactura con el estencil original, se observó la presencia de corto circuitos entre pines del componente afectado, causado por un volumen alto de aplicación de pasta.



	Original	Change
Stencil Number	ST4726.9	ST4811
Manufacturing Date (aaaa/mm/dd)	2018.08.28	2019.12.13
Stencil Thickness (mm)	0.127	0.101
Stencil Openings Area (mm ²)	16	16
Stencil Openings Volume (mm ³)	2.03	1.62
SPI Volume Results (mm ³)	2.50	2.01

Change 1;

- To reduce solder-balls in FET reference.
- To reduce solder bridges in ASIC & MCU area

Imagen 2.10. Historial de cambios del estencil

Tomando como base la interacción entre el valor de stand-off del componente, con el volumen de aplicación de pasta se encontró que si bien, el volumen de aplicación de pasta estaba dentro de los límites establecidos en el equipo, la altura de la pasta no era la suficiente como para llenar el espacio entre la máscara de soldadura del PCB y el pad del componente. Esto resulta en la falta de unión inter metálica entre ambos. Cabe mencionar que los estándares técnicos de Continental consideran una inspección al 100% del volumen de aplicación de pasta, más no una inspección de altura de ésta.

En la imagen 2.9 y las tablas 2.4 a 2.6 s muestran las herramientas de resolución de problemas: Diagrama de Ishikawa y análisis de 5 porqués utilizados para la definición de la causa raíz de la falta de unión de soldadura debajo del componente QFP.

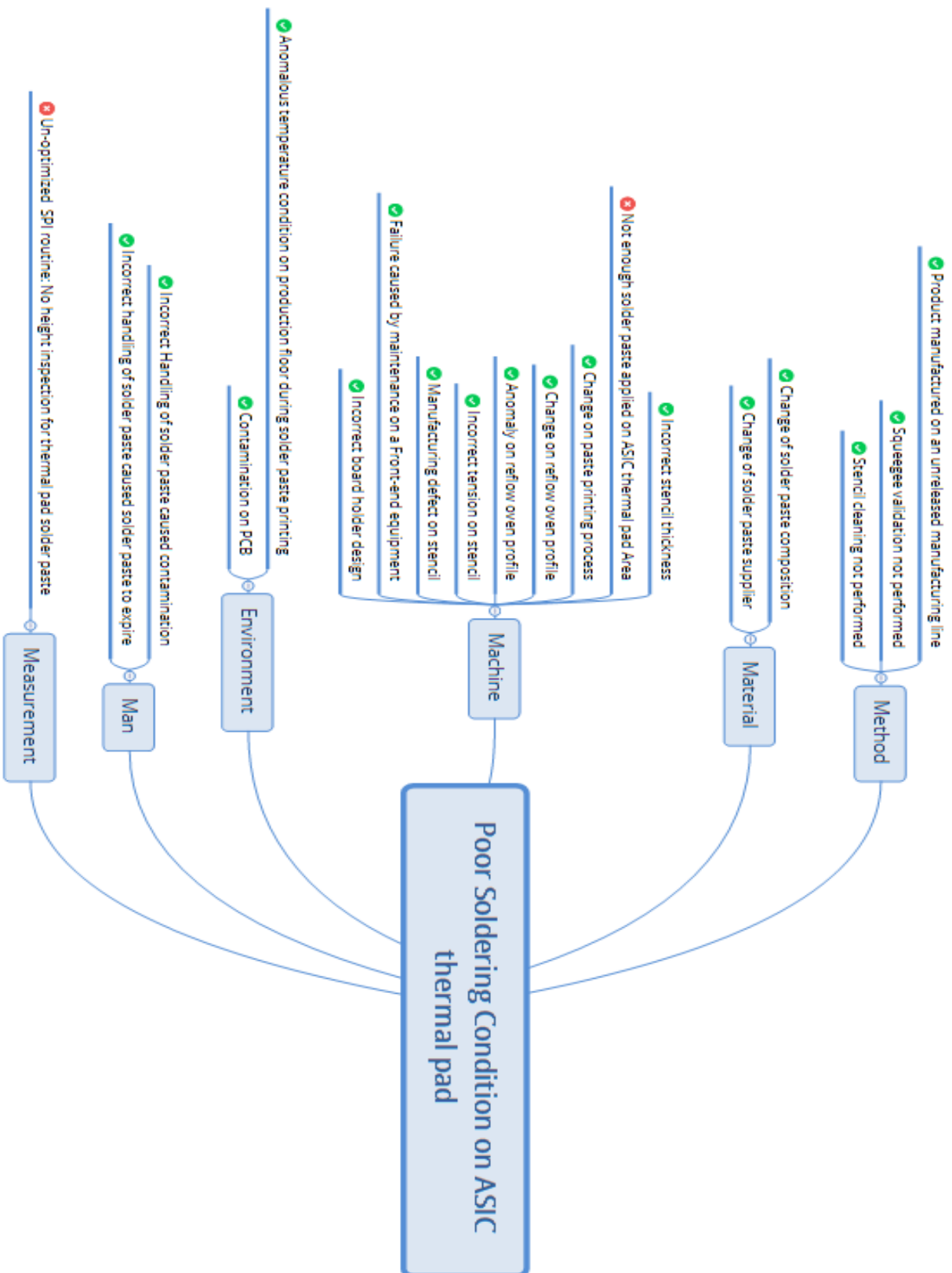


Imagen 2.11. Diagrama de Ishikawa

Category	Statement	Reason to consider	Reason to discard
Environment	Contamination on PCB		PCBs are stored on vacuum sealed bags, each SMD line has an inline PCB cleaner. All PCBs go through it before solder paste printing. In order to avoid unpopulated PCB leftovers, the production runs are set in function of the quantity of PCBs that come in a bag.
	Anomalous temperature conditions on production floor during solder paste printing		Temperature records on production floor were validated. No anomalies were found
Material	Change on solder paste composition		Continental uses solder paste Senju M31-GRN350-K1MK-V4, there hasn't been any changes since PV
	Change on solder paste supplier		Continental uses solder paste Senju M31-GRN350-K1MK-V4, there hasn't been any changes since PV
Man	Incorrect handling of Solder paste caused contamination		There is a SWI (standard work instruction) for Solder paste handling & Solder paste printer operation. All front end operators are trained on it.
	Incorrect handling of Solder paste caused SP expiration		Solder paste is kept at a controlled temperature. For FIFO, we have a rack that only allows operators to use solder paste that is at the appropriate temperature. We keep records of how many time has passed since a solder paste jar was opened.
Method	Product produced in an un-released manufacturing line		For front end, MGH100 ESC produced in one SMD line. On assembly line all equipments are dedicated to MGH100 ESC. Our traceability systems acts as a pokayoke, preventing a product to be assembled in a machine that hasn't been released for that product.
	Squeegee validation not performed		Squeegees are validated before start of production
	Stencil cleaning not performed		Cleaning is done by equipment, this is set up as a parameter on the equipment. After production, stencil are sent to the toolroom, where they're cleaned as well.

Tabla 2.4. Complemento Ishikawa 1

Category	Statement	Reason to consider	Reason to discard
Machine	Incorrect stencil thickness	Failure analysis shows that on failed parts there is little to no solder paste contact	Stencil thickness was measured. It was within spec
	Not enough solder paste applied on ASIC Thermal pad Area		
	Incorrect tension on Stencil		Stencil tension was measured. It was within spec
	Change on paste printing process		There hasn't been changes in Solder paste printing parameters since PV
	Change on reflow oven profile		There hasn't been changes in reflow oven profile parameters since PV
	Anomaly in reflow oven profile		We have a 100% monitoring by product. In case of having a disruption on the profile, the equipment will alarm
	Failure caused by maintenance on a front end equipment		Maintenance records were checked, no anomalies were detected.
	Manufacturing defect on stencil		Stencil incoming records were reviewed. No manufacturing anomalies were found on stencil
	Incorrect board holder design		Board holder design was reviewed. No risk of damaging units or having uneven solder paste application was found
	Un-optimized SPI routine- No height inspection for Thermal pad solder paste	There wasn't a SPI height spec on SPI. Therefore low solder paste condition could not be detected.	
Measurement			

Tabla 2.5. Complemento Ishikawa 2

	Why made	1st Why	2nd Why	3rd Why	4th Why	5th Why	Root Cause
Main Contributor to failure mode	Poor solder paste condition on ASIC Thermal Pad	No solder joint between ASIC Thermal pad & PCB	Paste printing height was not enough as to ensure physical contact between solder paste - ASIC THERMAL PAD & PCB	Stencil thickness on ASIC & MCU are was reduced from .125 to .1 mm			Due to a reduction of stencil thickness, the SP height was not enough as to ensure physical contact between ASIC Thermal pad & PCB
	Why made	1st Why	2nd Why	3rd Why	4th Why	5th Why	Root Cause
Additional contributor to failure mode	Higher amount of failures concentrated on 15-16 dec 2019	Paste printing height was not enough as to ensure physical contact between solder paste & ASIC THERMAL PAD & PCB	Variation in raw materials (ASIC/ PCB) increases GAP between PCB & ASIC THERMAL PAD				Due to inherent variation in raw materials, such as ASIC & PCB, the GAP between PCB & ASIC thermal pad increases, reaching a point where contact between them can't be assured
Main Contributor to failure mode	Poor solder paste condition on ASIC Thermal Pad	Unit reached EOL	Incorrect solder paste height condition not detected by SPI	No limit for solder paste height was considered on SPI	Failure mode was unknown to Continental		Due to this failure mode being unknown to Continental, no limits for solder paste height were considered on SPI, which caused for the incorrect condition not to be detected and reaching EOL
	WhyShipped	1st Why	2nd Why	3rd Why	4th Why	5th Why	Root Cause

Tabla 2.6. 5 porqués

Como una parte fundamental del análisis de causa raíz se utilizó un diagrama de Ishikawa (imagen 2.9), mediante el cual se identificaron factores que pudieran influir en el modo de falla presentado. En la tabla 2.5 se muestra el motivo por el cual los factores principales fueron confirmados o descartados.

Factores descartados

- Material producido en una línea de manufactura no liberada: Fue posible descartar este factor ya que se cuenta con un sistema de trazabilidad, en el cual se asigna un identificador único a la línea de montaje de SMD en el número de serie de la unidad. No se encontraron identificadores pertenecientes a líneas montaje distintos a la línea liberada.

PCB Serial number (Produced on Line AL)	
193535081322012000011	
193535	First 6 SUBASSY digits (Conti P.N.)
08	Variant Number
1	Unit index (Rev)
3	Laser marking equipment number
22	Manufacturing year
01	Manufacturing month
20	Manufacturing day
00001	Consecutive serial number
1	Position on PCB panel

Imagen 2.12. Estructura de los números de serie

- Cambios en la composición de la pasta de soldadura: La pasta de soldadura utilizada en este producto es la Senju M31-GRN360-K1MK-V4. Los cambios en el Bill of Materials (BOM) del producto en cuestión fueron analizados. No hubo cambios en lo referente a la pasta de soldadura.

Material

Plant/Usage/Alt. / 2 / 01

Description ECU ESC MGH100 w/o bracket GEM

Base Qty (EA) 1

Reqd Qty (EA) 1

Lv	Item	Component number	Object description	Component quantity	Un	Material Type	Sort String	Spare	Change Number	Profit Center	Stor. Loc.	Valid from	Valid to
2			solder paste M731-GRN360-K1-V4	0.000									
3	D001		solder paste M731-GRN360-K1-V4	1.000	EA							05/19/2016	12/31/9999

Imagen 2.13. Pasta de soldadura en BOM

- No realización de validación y/o mantenimientos a estencil y squeegees: Los registros de mantenimiento fueron validados. Mantenimientos y validaciones realizadas de acuerdo con el plan de mantenimiento vigente.
- Cambios en el perfil de temperatura del horno de reflujo: El historial de cambios del horno de reflujo fue validado. Se encontró que no había habido cambios desde el inicio de la producción en serie.

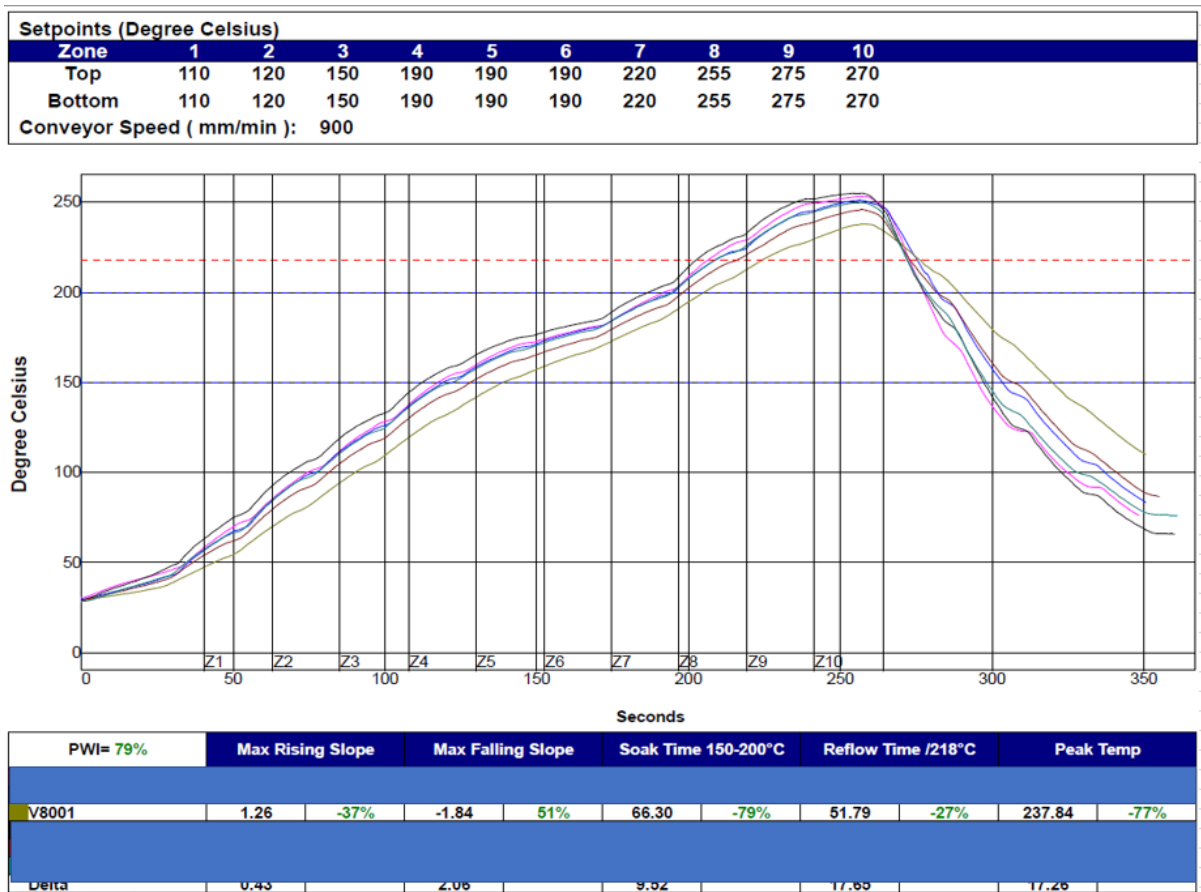


Imagen 2.14. Perfil de temperatura para el componente afectado

Factores comprobados

- No se aplicó una cantidad suficiente de pasta de soldadura en el *thermal pad* del ASIC afectado: El análisis físico (complementado con el análisis eléctrico) mostró que las unidades que presentaban la falla tenían poca o nada pasta de contacto de pasta de soldadura entre el *thermal pad* del ASIC y el PCB (Imagen 2.15).

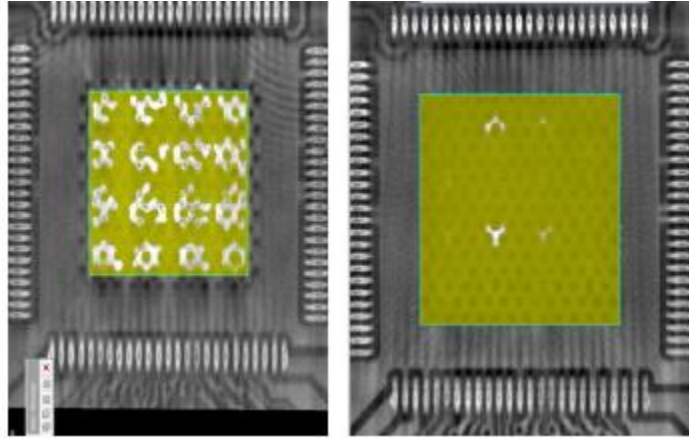


Imagen 2.15. Distribución de pasta de soldadura bajo ASIC en una unidad buena (Izquierda) y una mala (Derecha)

- Rutina de SPI no optimizada-No se realiza inspección de alturas en el área de thermal pad del ASIC: Las guías de proceso de Continental no definen como obligatoria la inspección de altura de pasta de soldadura, solamente la inspección de volumen. Por lo tanto, la inspección de altura no se realizó, permitiendo que, si bien había un volumen suficiente de acuerdo con el grosor del estencil, la altura del depósito de pasta no lograra tocar la parte inferior del thermal pad del ASIC.

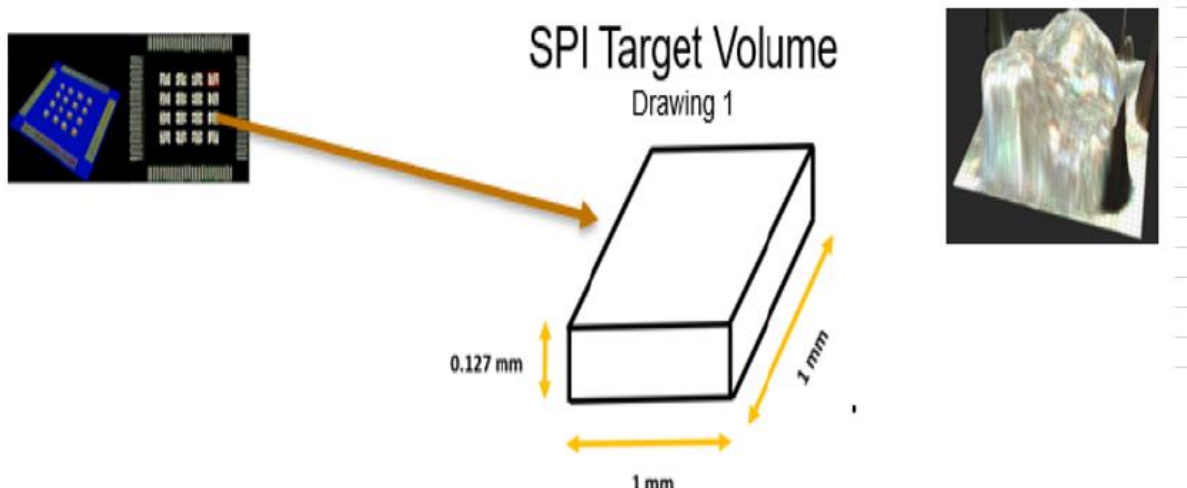


Imagen 2.16. Composición de un depósito de pasta de soldadura.

Como punto final del análisis se encontró que, debido al diseño del PCB, en el cual la máscara de soldadura del PCB no tiene un área designada para la impresión de pasta, por lo que la pasta se aplica directamente sobre la vía termal, con lo que siempre existirá un riesgo de filtrado de pasta, el cual no presentará un problema en sí mismo, siempre y cuando exista una unión inter metálica entre el PCB y el pad del componente.

2.2.- Conceptos y enfoques teóricos relacionados.

Favor de referirse a los siguientes conceptos:

- Volumen de impresión de pasta: Cantidad de pasta de soldadura aplicada posterior al proceso de impresión. El volumen teórico de pasta se define por la fórmula: $V = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{alto de la ventana de impresión}$.
- Presión de *squeegee*: La presión del *squeegee* es la fuerza con la cual un *squeegee* se presiona contra un estencil. (Kurtz Ersa, 2021). Una presión excesiva puede generar esparcimiento de pasta, mientras que una presión insuficiente puede causar un exceso de pasta en la apertura llevando a un incremento en la altura de ésta.

- Velocidad del *squeegee*: Velocidad con la que el *squeegee* hace rodar la pasta de soldadura a través del estencil. (Kurz Ersä, 2021).



Imagen 2.10. Ejemplo de squeegee metálico utilizado para la impresión de pasta de soldadura.

- Velocidad de separación: Velocidad a la cual el estencil se levanta de la *PCB*. (Kurz Ersä, 2021).
- Estencil: “Un estencil es una lámina de acero inoxidable utilizada en el ensamble de *PCB*. El estencil ayuda a transferir la pasta de soldadura con precisión y exactitud.” (Moko Technology, 2021)

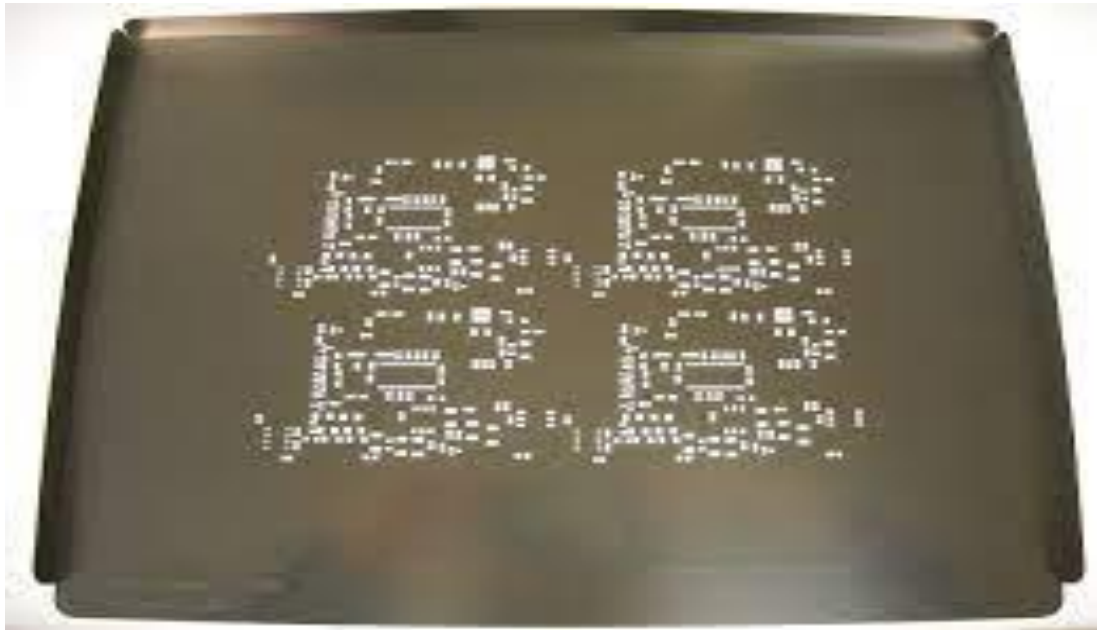


Imagen 2.11. Ejemplo de estencil usado en procesos de montaje en superficie

- Apertura del estencil: Ventana de impresión, hecha para ajustarse al tamaño del *pad* a soldar. (Bell Power solutions, 2016).
- Componente *Quad Flat Package* (QFP): se refiere a un tipo de empaquetado para circuitos integrados de montaje en superficie. La forma estándar de este tipo de empaquetado es el de un paquete plástico rectangular, con terminales en forma “ala de gaviota” extendiéndose por los 4 lados. Esta geometría de las terminales permite que el componente siente de manera estable sobre el PCB durante el proceso de ensamble. (NXP semiconductors, 2019).

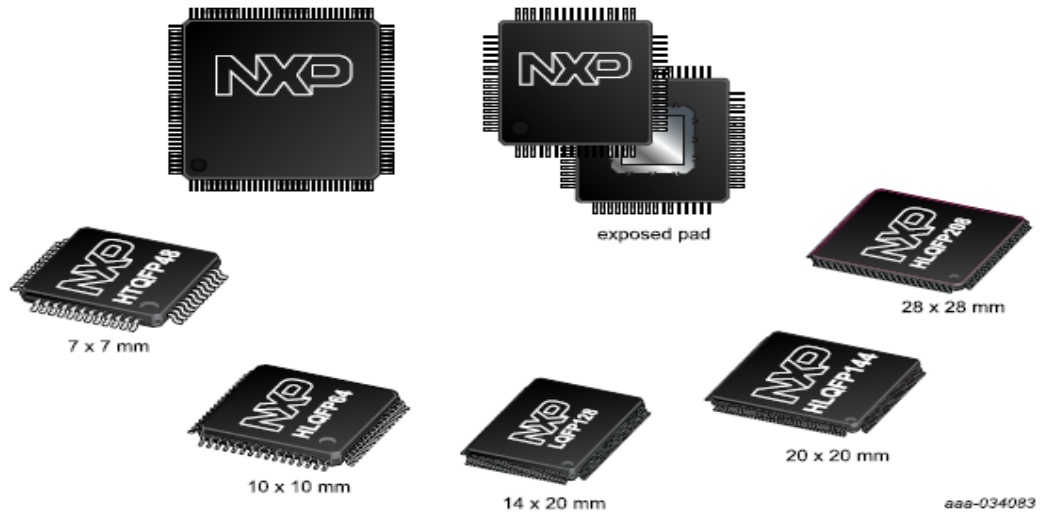


Imagen 2.12. Ejemplos de empaquetado QFP

- *Printed Circuit Board (PCB)*: “Una tarjeta de circuito impreso es un circuito cuyos componentes están contenidos dentro de una estructura mecánica”, generalmente hecha de fibra de vidrio. (Paterson , 2020).

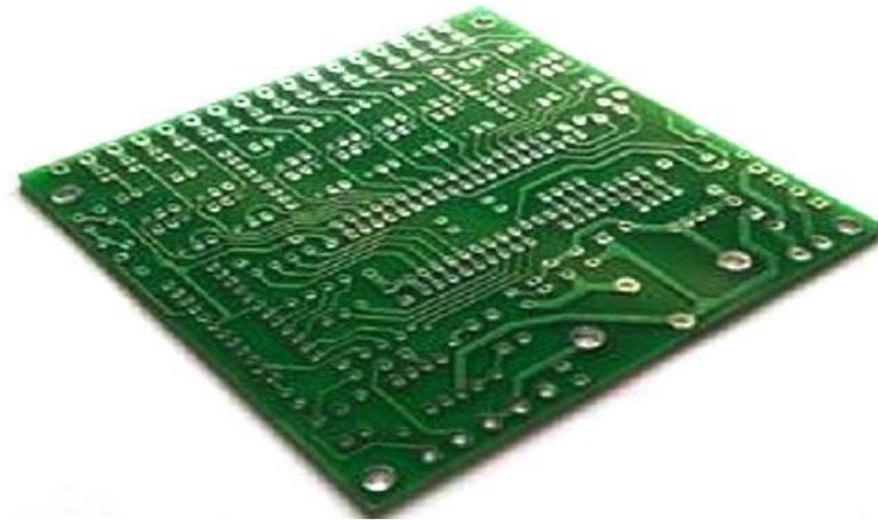


Imagen 2.14. Ejemplo de PCB

- *Surface Mount Technology (SMT)*: Es un área del ensamble electrónico, en el cual se montan componentes electrónicos sobre un PCB (imagen 2.14), opuesto a insertar componentes a través de agujeros en el PCB como se hace

en ensamble electrónico convencional. Este proceso permite reducir los costos de manufactura, así como obtener una utilización óptima del espacio en el PCB. (Surface Mount Process , 2021)

3.- Marco Metodológico de referencia.

3.1.- Análisis de referencia: Primera hipótesis.

Hipótesis de investigación: A través de la técnica del análisis de regresión, es posible establecer un modelo predictivo para que permita evitar la reducción en el volumen de impresión de pasta debido al desgaste de herramientas.

Hipótesis alterna: El análisis de regresión no es una técnica efectiva para la creación de un modelo predictivo del comportamiento del volumen de impresión de pasta debido al desgaste de herramientas.

3.1.1.- Matriz de marco lógico del problema.

Favor de referirse a la matriz de marco lógico del problema mostrada abajo.

Resumen Narrativo de Objetivos	Descripción	Indicadores	Medios de Verificación	Supuestos
Fin	Contribuir a la mejora y mantenimiento de los resultados financieros de Continental La Tijera, reduciendo los gastos por concepto de scrap y sorteos relacionados a la familia de Módulos de Control de líquido de frenos Mando MGH100	Disminución significativa del scrap y sorteos en la familia MGH100	*Base de datos de scrap de Continental. *Base de datos de reclamos externos de Continental	Continuidad de la producción de los proyectos de la familia MGH100
				Continuidad del diseño de los proyectos de la familia MGH100
				Continuidad de la tecnología utilizada para la producción de los proyectos de la familia MGH100
Propósito	Disminuir las fallas, tanto internas como externas, relacionadas a bajo volumen de soldadura en la familia MGH100	Scrap de Mando MGH100 alineado a la metra de Continental: 0.4% Máximo Eliminación de reclamos de calidad relacionados a bajo volumen de soldadura	*Base de datos de scrap de Continental. *Base de datos de reclamos externos de Continental	No se presentan problemas relacionados a proveeduría de pasta de soldadura
				No se presenta un rediseño del PCB
				No se presenta un rediseño del estencil
Componentes	Desarrollo de un método de procedimiento que permita el mantenimiento del volumen de impresión de pasta	Implementación del modelo de calidad en Continental La Tijera	*Base de datos global de lecciones aprendidas. *Sistema de gestión de documentos de Continental La Tijera	Apoyo de gerencia de calidad y operaciones
Actividades	Desarrollo de un modelo de calidad que permita el mantenimiento del volumen de impresión de pasta	Volumen de pasta de soldadura en equipo de SPI (Solder Paste Inspection)	Registro de Volumen de Pasta de Soldadura en Koh Young	Apoyo de gerencia de calidad y operaciones
	Desarrollo de un modelo de regresión que permita el cambio de estenciles de manera preventiva			Equipo de SPI guarda registros de volumen de pasta de soldadura

Tabla 3.1. Matriz de Marco lógico del problema

3.1.2.- Mapa de problemática.

Favor de referirse al siguiente mapa de problemática para una descripción detallada de la situación en cuestión:

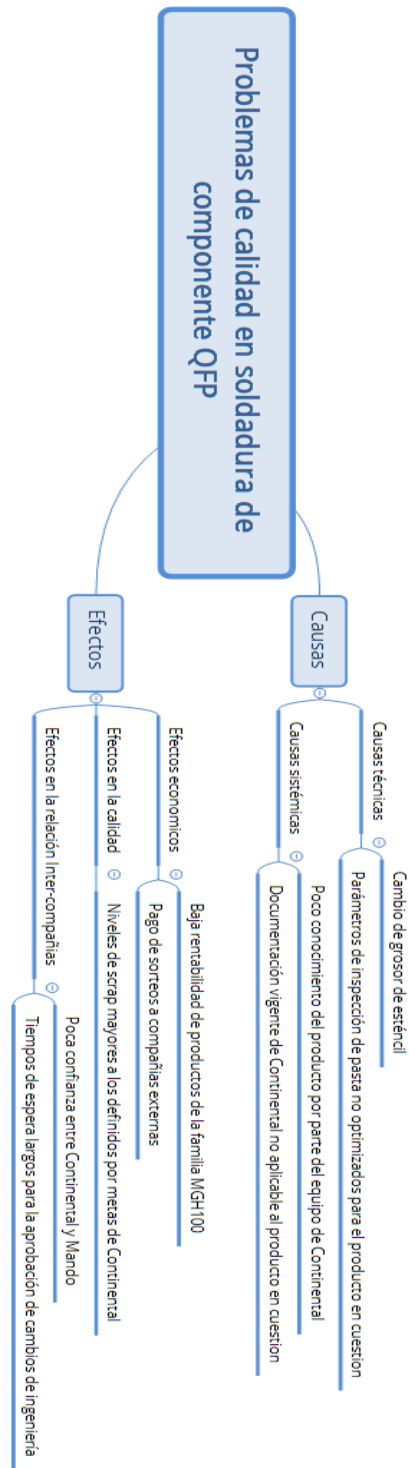


Imagen 3.1. Mapa de problemática

3.1.3.- Diagrama de Causa-Efecto o Diagrama de Ishikawa

Favor de referirse al Diagrama de Ishikawa y 5 porqués siguiente:

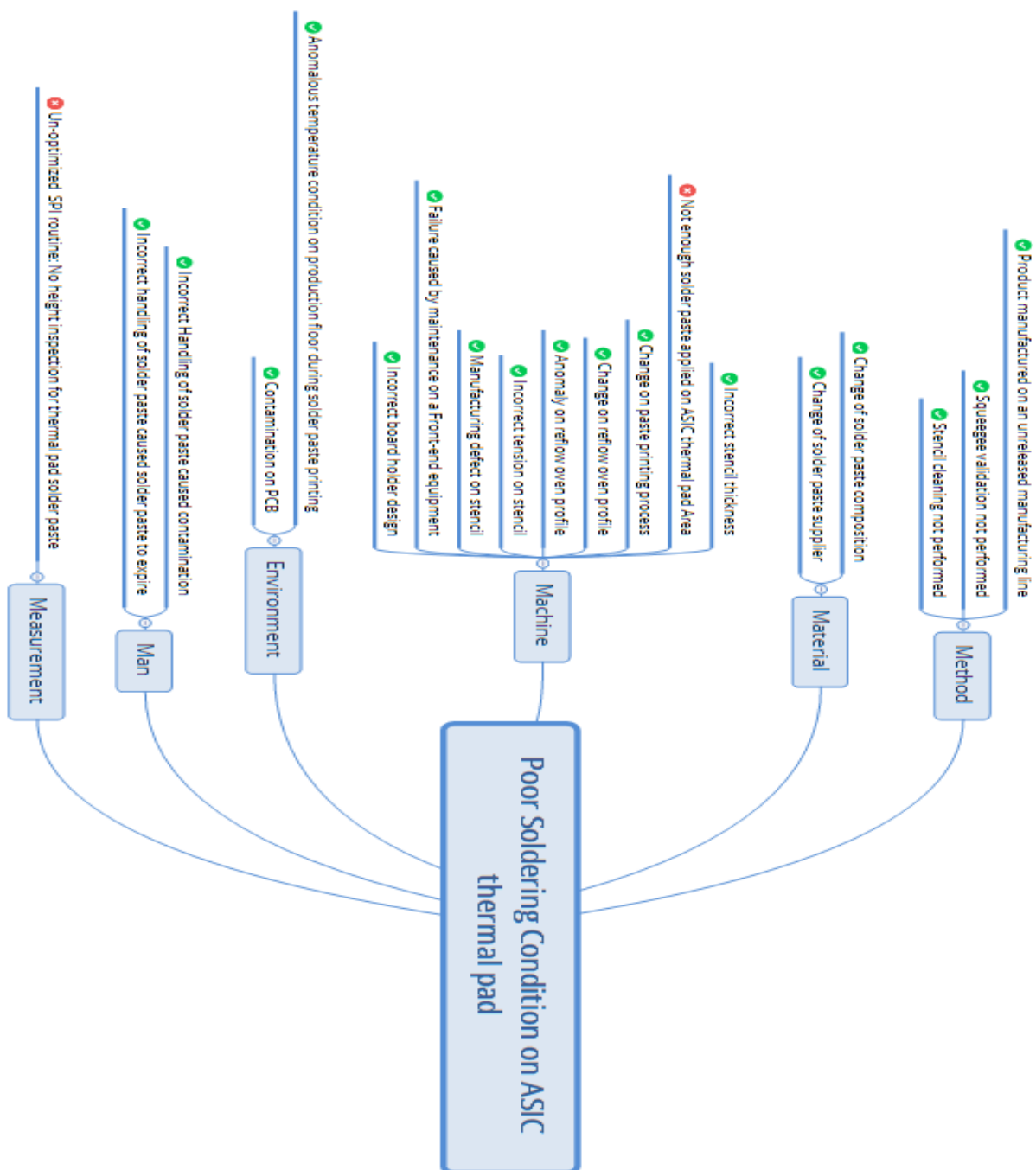


Imagen 3.2. Diagrama de Ishikawa

Category	Statement	Reason to consider	Reason to discard
Environment	Contamination on PCB		PCBs are stored on vacuum sealed bags, each SMD line has an inline PCB cleaner. All PCBs go through it before solder paste printing. In order to avoid unpopulated PCB leftovers, the production runs are set in function of the quantity of PCBs that come in a bag.
	Anomalous temperature conditions on production floor during solder paste printing		Temperature records on production floor were validated. No anomalies were found
Material	Change on solder paste composition		Continental uses solder paste Senju M31-GRN350-K1MK-V4, there hasn't been any changes since IV
	Change on solder paste supplier		Continental uses solder paste Senju M31-GRN350-K1MK-V4, there hasn't been any changes since IV
Man	Incorrect handling of Solder paste caused contamination		There is a SWI standard work instruction) for Solder paste handling & Solder paste printer operation. All front end operators are trained on it.
	Incorrect handling of Solder paste caused SP expiration		Solder paste is kept at a controlled temperature. For FIFO, we have a rack that only allows operators to use solder paste that is at the appropriate temperature. We keep records of how many time has passed since a solder paste jar was opened.
Method	Product produced in an un-released manufacturing line		For front end, MGH100 ESC produced in one SMD line. On assembly line all equipments are dedicated to MGH100 ESC. Our traceability systems acts as a pokayoke, preventing a product to be assembled in a machine that hasn't been released for that product.
	Squeegee validation not performed		Squeegees are validated before start of production
	Stencil cleaning not performed		Cleaning is done by equipment, this is set up as a parameter on the equipment. After production, stencil are sent to the toolroom, were they're cleaned as well.

Tabla 3.2. Complemento Ishikawa 1

Category	Statement	Reason to consider	Reason to discard
Machine	Incorrect stencil thickness		Stencil thickness was measured. It was within spec
	Not enough solder paste applied on ASIC Thermal pad Area	Failure analysis shows that on failed parts there is little to no solder paste contact	
	Incorrect tension on Stencil		Stencil tension was measured. It was within spec
	Change on paste printing process		There hasn't been changes in Solder paste printing parameters since PV
	Change on reflow oven profile		There hasn't been changes in reflow oven profile parameters since PV
	Anomaly in reflow oven profile		We have a 100% monitoring by probe, in case of having a disruption on the profile, the equipment will alarm
	Failure caused by maintenance on a front end equipment		Maintenance records were checked, no anomalies were detected.
	Manufacturing defect on stencil		Stencil incoming records were reviewed. No manufacturing anomalies were found on stencil
	Incorrect board holder design		Board holder design was reviewed. No risk of damaging units or having uneven solder paste application was found
Measurement	Un-optimized SPI routine- No height inspection for Thermal pad solder paste	There wasn't a SPI height spec on SPI. Therefore low solder paste condition could not be detected.	

Tabla 3.3. Complemento Ishikawa 2

Main Contributor to failure mode	Why made	1st Why	2nd Why	3rd Why	4th Why	5th Why	Root Cause
	Poor solder paste condition on ASIC Thermal Pad	No solder joint between ASIC Thermal pad & PCB	Paste printing height was not enough as to ensure physical contact between solder paste - ASIC THERMAL PAD & PCB	Stencil thickness on ASIC & MCU are was reduced from .125 to .1 mm			Due to a reduction of stencil thickness, the SP height was not enough as to ensure physical contact between ASIC Thermal pad & PCB
	Why made	1st Why	2nd Why	3rd Why	4th Why	5th Why	Root Cause
Additional contributor to failure mode	Higher amount of failures concentrated on 15-16 dec 2019	Paste printing height was not enough as to ensure physical contact between solder paste & ASIC THERMAL PAD & PCB	Variation in raw materials (ASIC/ PCB) increases GAP between PCB & ASIC THERMAL PAD				Due to inherent variation in raw materials, such as ASIC & PCB, the GAP between PCB & ASIC thermal pad increases, reaching a point where contact between them cant be assured
	WhyShipped	1st Why	2nd Why	3rd Why	4th Why	5th Why	Root Cause
Main Contributor to failure mode	Poor solder paste condition on ASIC Thermal Pad	Unit reached EOL	Incorrect solder paste height condition not detected by SPI	No limit for solder paste height was considered on SPI	Failure mode was unknown to Continental		Due to this failure mode being unknown to Continental, no limits for solder paste height were considered on SPI, which caused for the incorrect condition not to be detected and reaching EOL

Tabla 3.4. 5 porqués

3.1.4.- Mapas de relaciones

Favor de referirse al mapa de relaciones mostrado abajo.

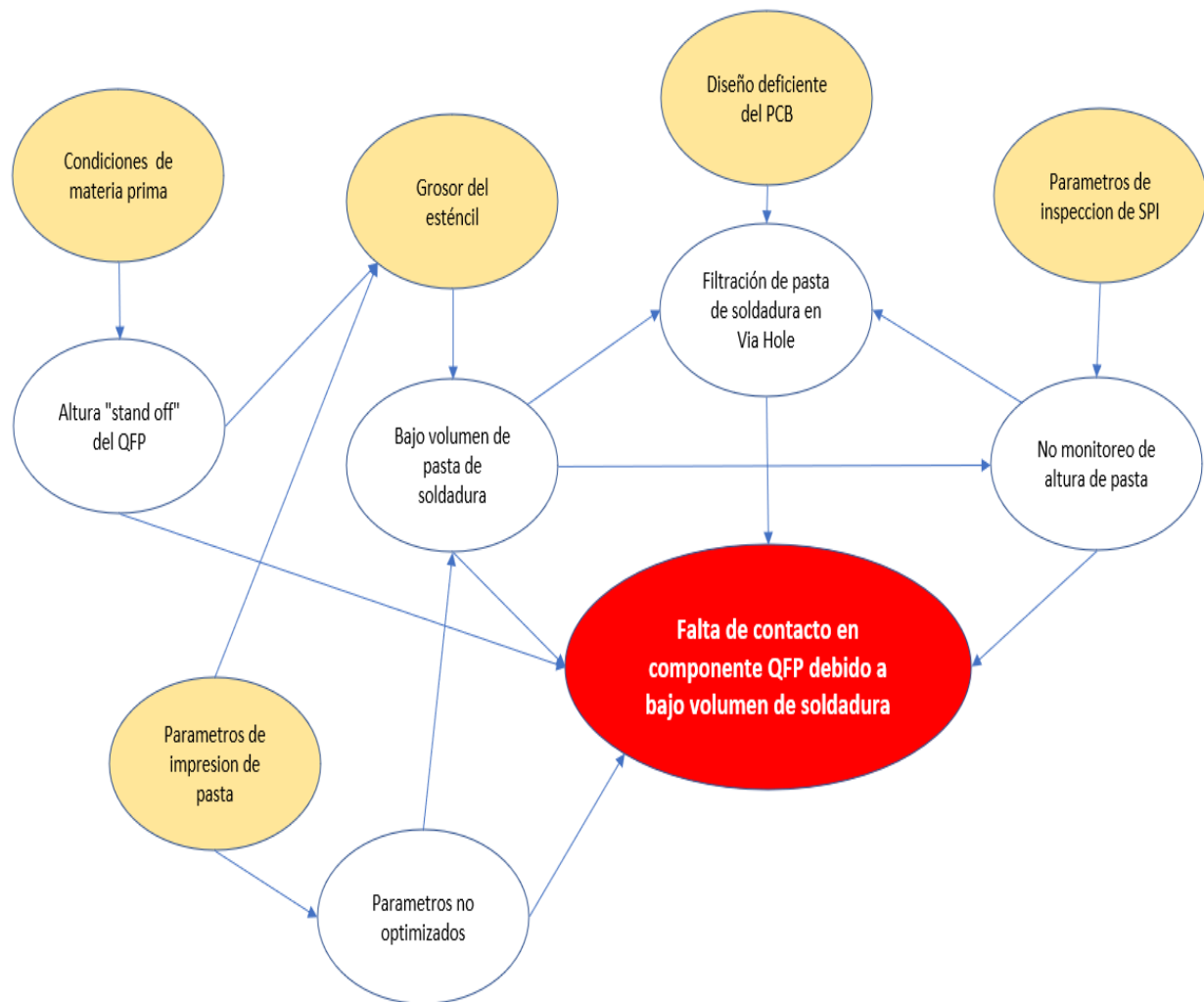


Imagen 3.3. Mapa de relaciones

3.2.- Definición preliminar de la metodología, selección de las herramientas requeridas y cronograma

Se planea utilizar el análisis de regresión, metodología que “se utiliza en análisis de datos y desarrollo de modelos empíricos, una vez que un modelo de regresión da un ajuste adecuado, este puede utilizarse para la predicción, control o para obtener más conocimiento del mecanismo que genera la información” (Snee, 1977) debido a su capacidad para modelar procesos, con el fin de predecir el tiempo de vida óptimo de

los esténciles, evaluando la relación entre el volumen de impresión de pasta contra el tiempo de uso de este herramental en producción.

Enfoque: Cuantitativo.

Instrumentos por utilizar: Análisis de regresión

Criterios de inclusión/ exclusión:

- Inclusión: Plataforma MGH100 ESC.
- Exclusión: Proyectos para los cuales el diseño del *PCB* fue hecho por Continental.
- **Tamaño de muestra y universo:**
 - Tamaño de muestra (análisis de regresión): el valor promedio de la altura y volumen de todas las unidades producidas, tomadas en intervalos de 1000 unidades.
 - Universo: Toda la producción de la plataforma MGH100 ESC (el volumen fluctúa debido a la escasez global de semiconductores).

3.3.- Metas de información

A través del análisis de regresión se busca obtener el valor promedio de los 10 volúmenes de pasta de soldadura más bajos en el componente QFP ASIC sujeto del estudio.

Las características requeridas para el análisis de esta información son los siguientes:

- Cada volumen debe de ser trazable a un serial de PCB, con el fin de asegurar que se está analizando la producción de una semana en particular, permitiendo observar el comportamiento del volumen a lo largo del tiempo.
- El volumen debe de ser medido en mm³.

3.4.- Identificación, descripción y cuantificación de métricas iniciales

Con esta información se busca hacer un modelo de regresión que permita predecir el punto en el cual el volumen de soldadura comenzará a disminuir, con lo cual será posible establecer un punto de reorden para la compra de estenciles de repuesto. El modelo y ecuación de regresión serán calculados utilizando el software Curve Expert. La confiabilidad estadística del modelo será comprobada utilizando Minitab.

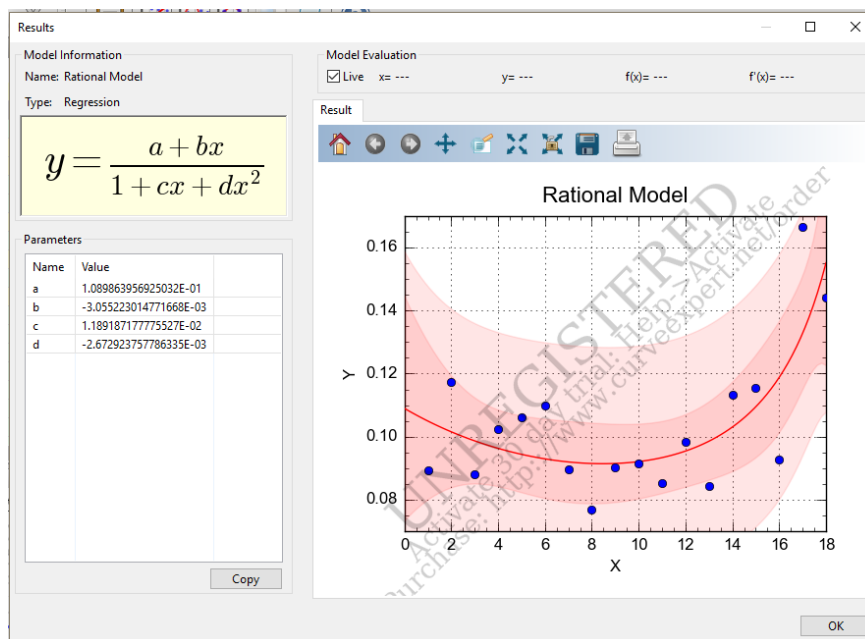


Imagen 3.3. Modelo de regresión de un estencil obsoleto de la plataforma MGH100 ESC GEM

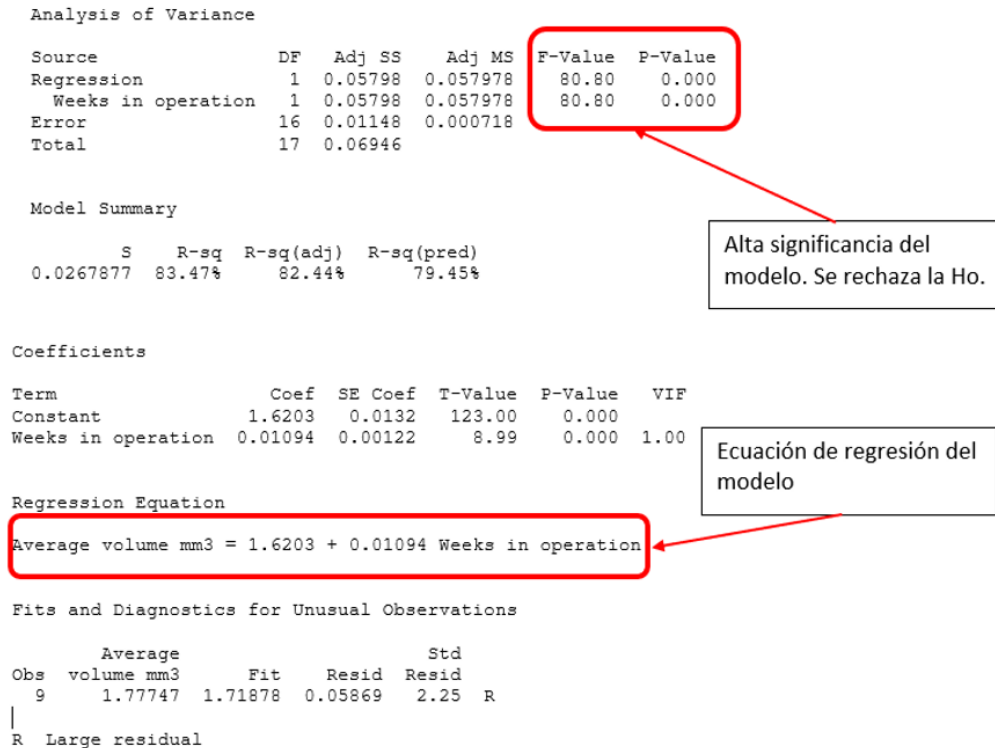


Imagen 3.4. Ejemplo de validación de confiabilidad estadística en Minitab

3.5.- Descripción del análisis: correlación e interpretación de la información sostenida

Para hacer en análisis de regresión del volumen de pasta de soldadura será necesario el registro de todos los volúmenes de pasta de soldadura para el componente QFP ASIC, en una semana dada.

La información debe de cumplir con las siguientes características:

- Cada volumen debe de ser trazable a un serial de PCB, con el fin de asegurar que se está analizando la producción de una semana en particular, permitiendo observar el comportamiento del volumen a lo largo del tiempo.
- El volumen debe de ser medido en mm³.

4.- Estrategia de investigación

La investigación se basa en la utilización de la regresión, lineal o no lineal, de una variable independiente (cantidad de piezas producidas) contra una variable dependiente (volumen y/o altura de impresión de pasta), con el fin de crear un modelo predictivo que permita la definición de un punto de reorden de estenciles previo al momento en el que el volumen y/o altura de impresión de pasta comience a mostrar una tendencia al límite inferior de especificación para estos parámetros.

De acuerdo con el artículo *Predictive Analytics: A Review of Trends and Techniques*, “La teoría de la probabilidad y el análisis de regresión son las técnicas populares en análisis de datos. Similarmente, las redes neuronales artificiales y árboles de decisión son herramientas para el aprendizaje de máquinas que son ampliamente utilizadas en aplicaciones de análisis predictivo” (Kumar & Garg, 2018). Con lo que se establece un precedente para el uso del análisis de regresión como una herramienta viable para la creación de modelos predictivos.

4.1. Justificación de la estrategia de investigación

Se planea utilizar el análisis de regresión, metodología que “se utiliza en análisis de datos y desarrollo de modelos empíricos, una vez que un modelo de regresión da un ajuste adecuado, este puede utilizarse para la predicción, control o para obtener más conocimiento del mecanismo que genera la información” (Snee, 1977) debido a su capacidad para modelar y optimizar los parámetros de un proceso.

La efectividad del análisis de regresión como modelo predictivo y de mejora ha sido demostrada en experimentos tales como los realizados Sahoo, Baral, Rout y Routra, en el que, mediante el uso del análisis de regresiones lineales múltiples (MLR), se logró la optimización de velocidades y profundidades de corte en tornos con el fin de mejorar

la rugosidad superficial de barras de acero AISI 1040. (Kumar, Baral, Rout, & Routra, 2012).

4.1.1 Consideraciones costo/beneficio de la estrategia

Para la correcta ejecución de la estrategia antes mencionada es necesaria la consideración de los siguientes factores:

- Tiempo de recolección de datos (Raw data): Los datos son generados con base en la producción de piezas de productos de la plataforma MGH100 ESC GEM, por lo cual están sujetos a variaciones en la demanda del cliente final, así como a la disponibilidad de materiales. El principal riesgo para este factor es la baja disponibilidad de semiconductores generada a raíz de la pandemia COVID 19.
- Tiempo de limpieza de datos: Los datos entregados por el software SPC Plus (ver capítulo 4.2) contienen información de pines del componente ASIC, los cuales no son relevantes para este estudio. Por lo tanto, deben de ser limpiados de manera manual.

Por otro lado, es importante notar que las herramientas y software necesarios para la ejecución de este proyecto son adquiridas por Continental y están implementadas, por lo que la realización de una inversión no es necesaria.

4.2.- Herramientas e instrumentos

Con el fin de realizar las actividades mencionadas anteriormente, las siguientes herramientas serán utilizadas:

- SPC Plus: Software diseñado por Koh Young Technology Inc. para los equipos de SPI (Solder paste inspection). El propósito de este software es el de servir como base de datos para las mediciones de impresión de pasta, así como el de llevar un control estadístico de la producción (SPC). Es a través de SPC plus que

los datos (raw data) de las mediciones de impresión de pasta para el proyecto MGH100 ESC GEM son obtenidas.

- Microsoft Excel: Excel será utilizado para organizar los datos de las mediciones de impresión de pasta, así como para generar los modelos de regresión iniciales, es decir, sin ajustar.
- Minitab: El software estadístico Minitab será utilizado para la validación estadística de los modelos de regresión, mediante pruebas de bondad de ajuste y *lack of fit*.
- Curve Expert: El software Curve Expert será utilizado para encontrar la distribución que tenga el mejor ajuste a los datos a analizar, a través de la función curve finder (Imagen 4.1. y 4.2.).

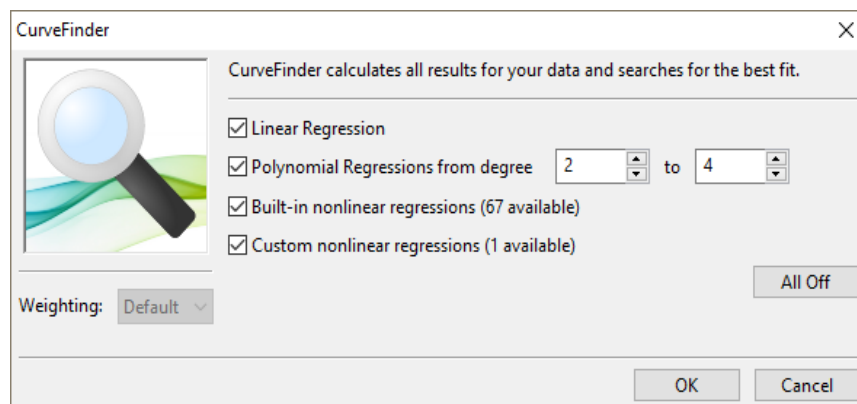


Imagen 4.1. Función Curve Finder de Curve Expert.

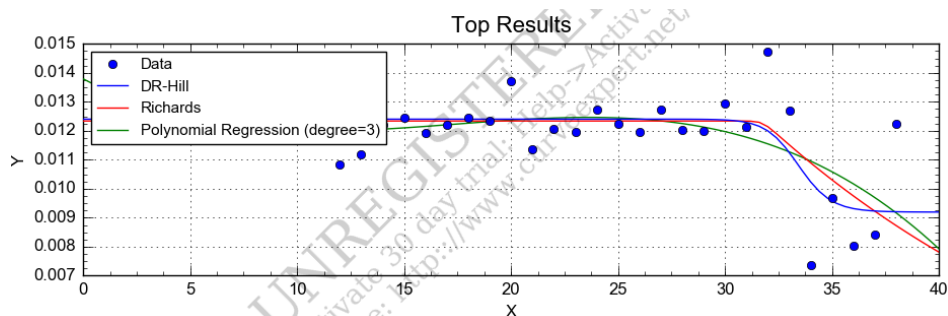


Imagen 4.2. Ejemplo de propuestas de distribuciones en Curve Expert.

4.3.- Etapas del proceso de aplicación/ investigación

El proceso de desarrollo del modelo de mantenimiento de la calidad para las uniones de soldadura de los productos de la familia MGH100 se dividirá en dos secciones: desarrollo del modelo de regresión y documentación de lecciones aprendidas y buenas prácticas, los cuales, al conjuntarse, formarán el manual de mantenimiento de la calidad. Favor de referirse a los siguientes diagramas de flujo para una explicación detallada del proceso a seguir.

Es importante notar que el flujograma (imagen 4.4) para el desarrollo del modelo de regresión está alineado con los pasos para el análisis predictivo descritos en *Predictive Analytics: A Review of Trends and Techniques* (Kumar & Garg, 2018), los cuales son:

- Recolección de requerimientos.
- Recolección de datos.
- Análisis y limpieza de datos.
- Análisis estadístico de los datos
- Modelado predictivo.
- Predicción y monitoreo.

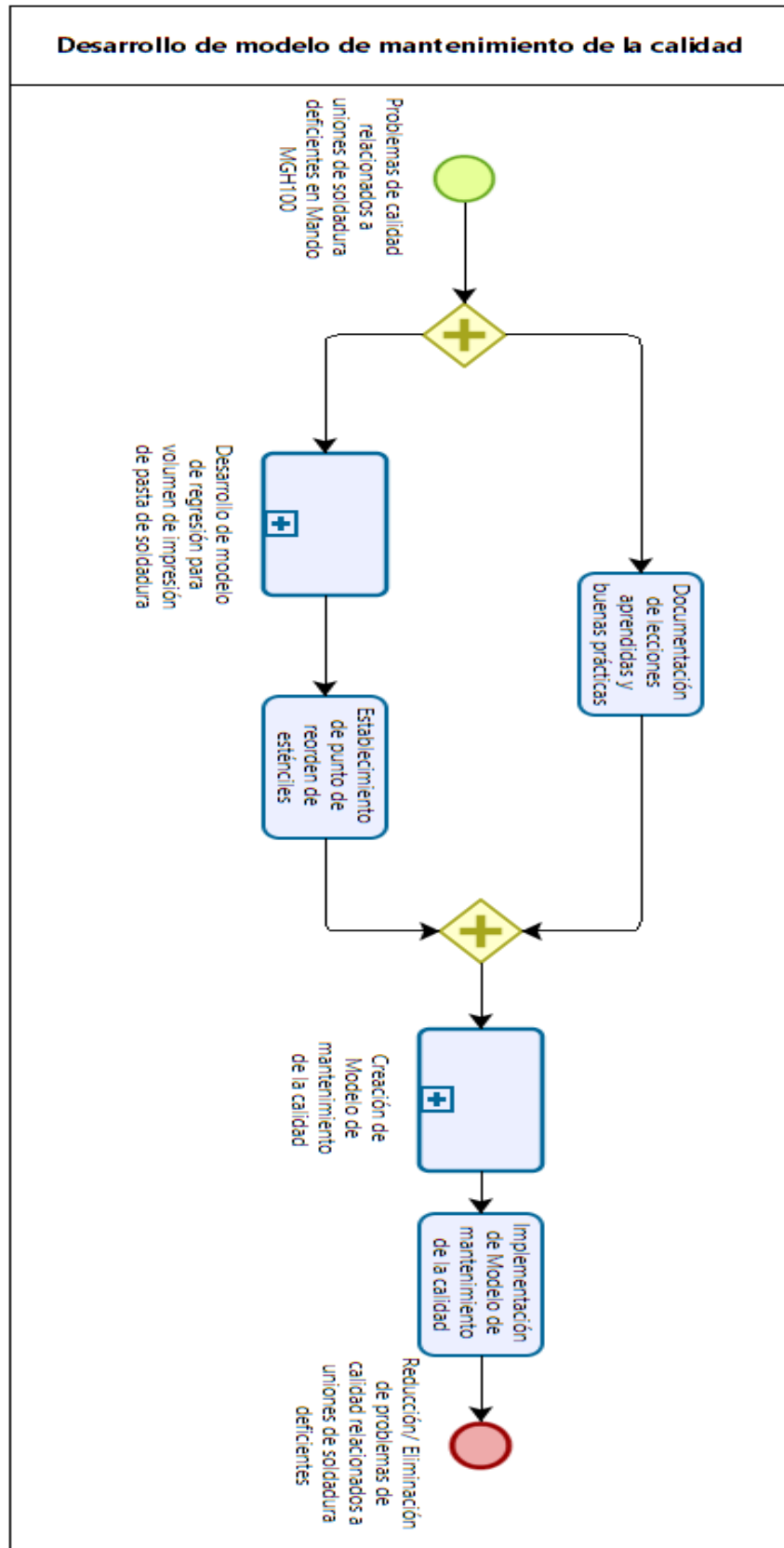


Imagen 4.3. Flujograma general del desarrollo del modelo de mantenimiento de la calidad

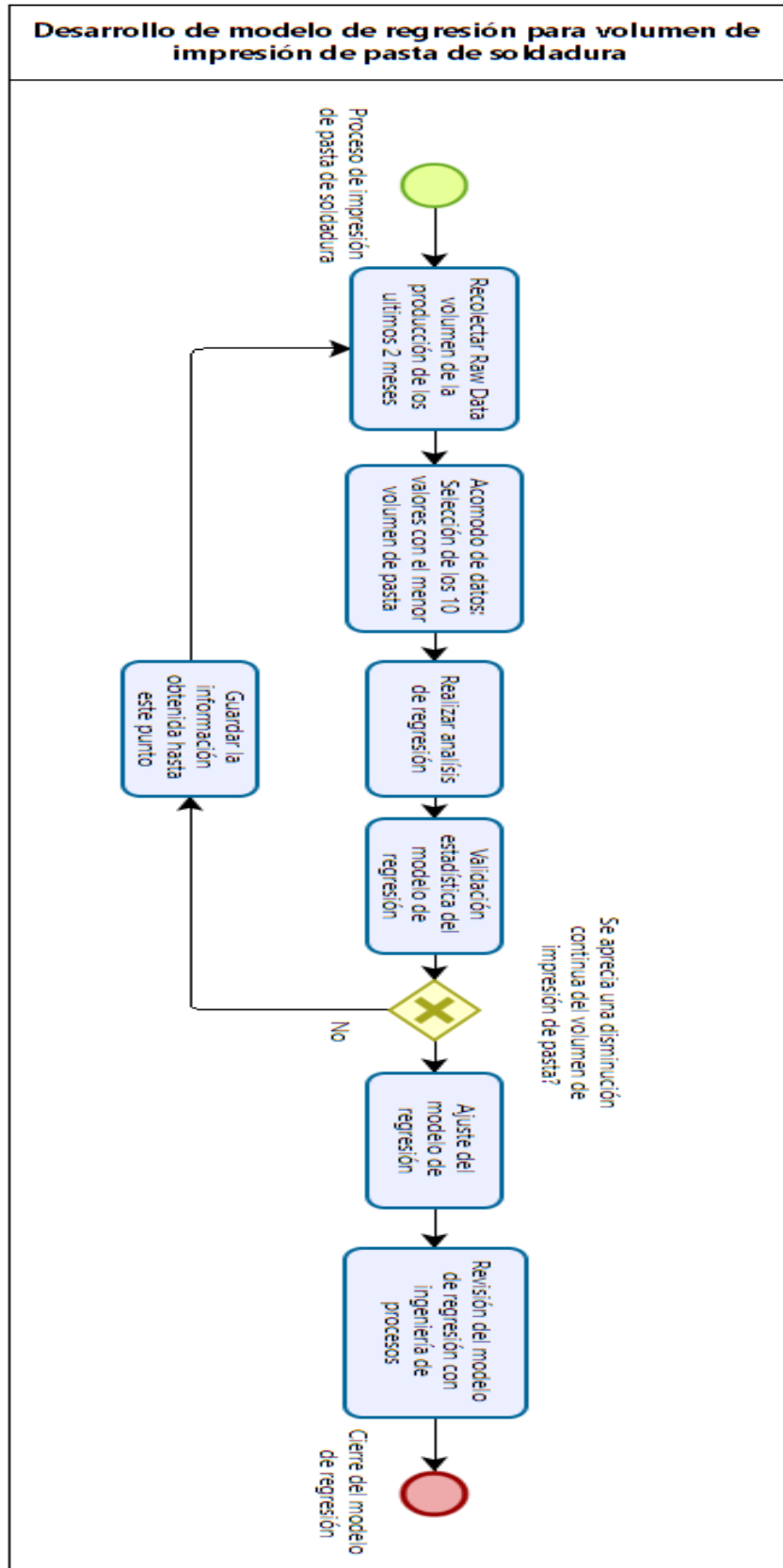


Imagen 4.4. Flujograma del desarrollo del modelo de regresión

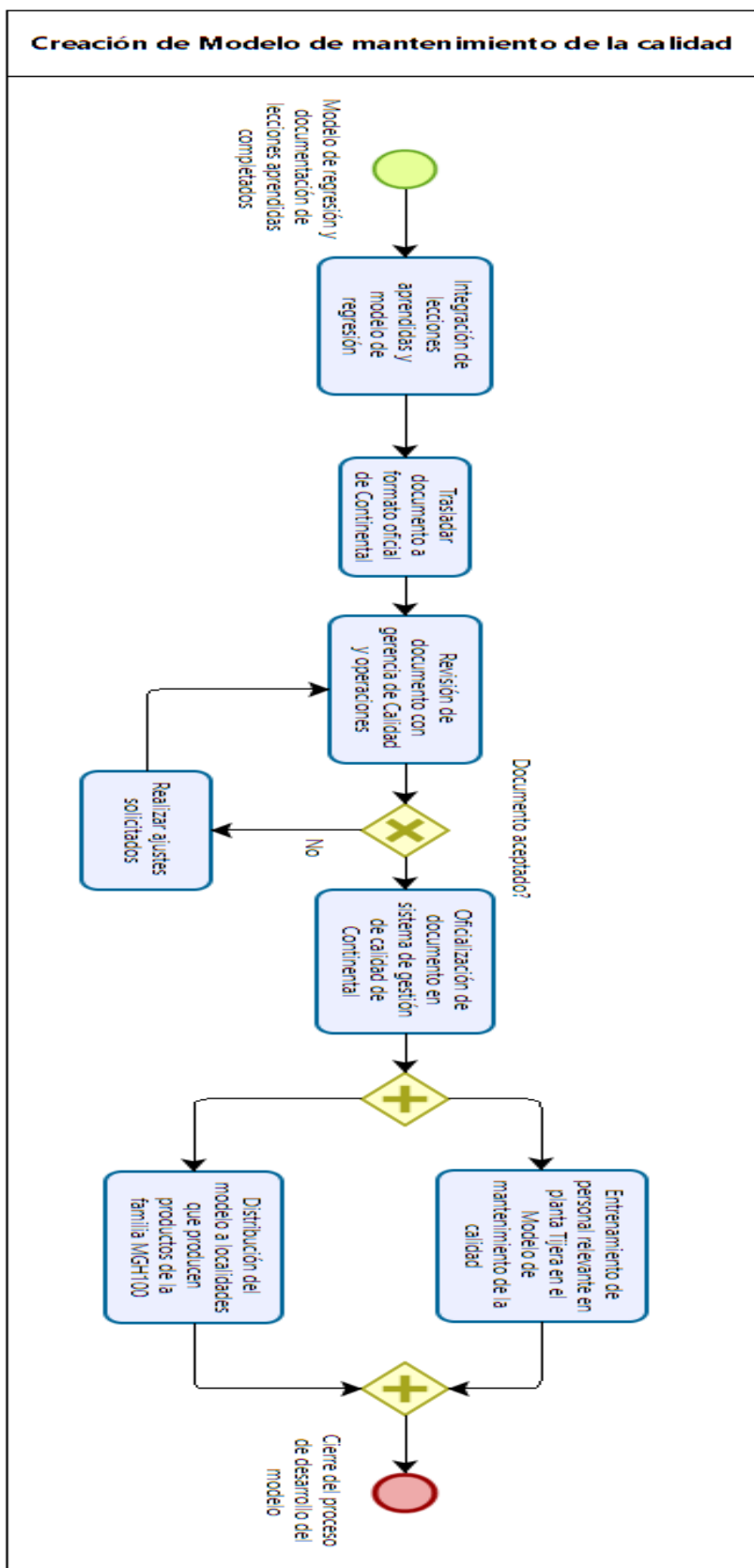


Ilustración 1Imagen 4.5. Flujograma del proceso de creación del modelo de mantenimiento de la calidad

4.3.1.- Cronograma de trabajo

Favor de referirse al cronograma en el documento embebido para una explicación detallada de las actividades a realizar como parte del TOG.

Actividad	2021												2022				
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre			
Inicio de preparación del TOG																	
Primer avance del TOG																	
Seguimiento a TOG																	
Segundo avance del TOG																	
Seguimiento a TOG																	
Tercer avance del TOG																	
Documentación de manual de calidad																	
Primer análisis de regresión para estímul MGH100 ESC GEM																	
Seguimiento a TOG																	
Cuarto Avance																	
Seguimiento a TOG																	
Quinto Avance																	
Segundo análisis de regresión para estímul MGH100 ESC GEM																	
Primer análisis de regresión para estímul MGH100 MOCI																	
Seguimiento a TOG																	
Tercer análisis de regresión para estímul MGH100 ESC GEM																	
Segundo análisis de regresión para estímul MGH100 MOCI																	
Seguimiento a TOG																	
Tercer análisis de regresión para estímul MGH100 MOCI																	
Documentación de resultados de análisis de regresión																	
Integración de resultados de análisis de regresión y manual de calidad en el TOG																	
Presentación del TOG																	

4.3.2.- Imprevistos

Los factores externos que pudieran afectar al desarrollo de este proyecto son los siguientes:

- Escasez de semiconductores: En la actualidad la industria electrónica enfrenta una situación de escasez de semiconductores derivada de la pandemia COVID 19. Es por esto que existe una posibilidad de que, debido a falta de materia prima, el proyecto deba suspenderse por un tiempo indeterminado.
- Fluctuaciones en la demanda: Una baja inesperada en la demanda de los productos de la plataforma MGH100 pudiera resultar en un ritmo de producción menor al esperado o en un alto de la producción. Esto resultaría en la suspensión del proyecto.
- Rediseño del PCB de la plataforma MGH100: Al tratarse de un proyecto *build to print*, existe la posibilidad de que el cliente decida implementar un rediseño del PCB, lo cual invalidaría los resultados de esta investigación.
- Limitantes técnicas de Excel: Debido al tamaño de las bases de datos utilizadas para la ejecución de este proyecto, existe la posibilidad de que Excel no sea capaz de manejar los datos de todas las unidades analizadas.
- Bajo nivel de determinación del modelo de regresión: Posterior al análisis, pudiera determinarse que la capacidad predictiva del modelo no es la adecuada.
- No significancia estadística del modelo de regresión: Posterior al análisis, pudiera determinarse que el modelo de regresión no es estadísticamente significativo.

5.- Exposición de hallazgos

En el capítulo 5 se describe la organización y análisis de los datos utilizados como parte del estudio. Para comprender este análisis es necesario profundizar en los siguientes conceptos:

- Posición de impresión de pasta: El estencil de la plataforma MGH100 ESC GEM está diseñado para producir 3 piezas en cada ciclo de impresión. Si bien en teoría cada posición es una copia fiel de las demás, se decidió monitorearlas de manera individual, con el fin de identificar patrones que pudieran indicar comportamientos anómalos en una de las posiciones.
- Cantidad de piezas producidas: Una vez comenzada la recolección de datos, se encontró que el máximo de datos que es posible recopilar por base mensual son 3000 datos (de manera independiente a la producción total del mes). Esto es debido a limitantes técnicas en el equipo que lleva el registro de los datos de impresión de pasta. La excepción de esta condición fue el mes de junio 2021, en el cual, debido a la distribución de la demanda, fue posible establecer dos subgrupos de datos.
- Altura promedio (*AVG heigth*): Esta altura se obtiene promediando la altura de cada uno de los depósitos de soldadura (16 en total) que conforman el área de impresión de una pieza. Después de eso se hace un promedio de todas las muestras, divididas en subgrupos de 1000 piezas cada uno.
- Desviación estándar promedio (*SDT dev heigth*): Similar a la altura promedio, se obtiene la desviación estándar, por unidad, de la altura de cada uno de los depósitos de soldadura, para después hacer un promedio del subgrupo.
- Δ heigth: Se realizó una resta entre el valor mayor de altura de un depósito de soldadura contra el valor menor de altura de un depósito de soldadura. Posterior a eso se calculó el promedio por subgrupo.

5.1.- Organización de la información obtenida

Los valores de 41000 unidades por posición del esténcil, lo cual equivale a 123000 unidades producidas en total, fueron compilados en la tabla 5.1.

En esta tabla se compilan, por mes de producción y por posición de impresión del esténcil, los siguientes datos:

- Cantidad de piezas producidas: Cada mes de producción se divide en 3 subgrupos de 1000 piezas cada uno.
- Altura Promedio de impresión de pasta (AVG Height): Para cada subgrupo de 1000 piezas, se obtuvo un promedio del valor de altura de impresión de pasta.
- Desviación estándar de impresión de pasta (STD dev Height): Para cada subgrupo de 1000 piezas, se obtuvo la desviación estándar de los valores de altura de impresión de pasta.
- Rango de altura de impresión de pasta (Δ Height): Para cada subgrupo de 1000 piezas, se obtuvo un promedio de la diferencia entre el valor máximo y mínimo de impresión de pasta.

Posición 1						Posición 2						Posición 3					
Mes	Año	Piezas producidas	AVG Height	STD dev Height	Δ Height	Mes	Año	Piezas producidas	AVG Height	STD dev Height	Δ Height	Mes	Año	Piezas producidas	AVG Height	STD dev Height	Δ Height
Enero	2021	1K	0.1585805	0.02332721	0.0414799	Enero	2021	1K	0.15892056	0.03371645	0.040672	Enero	2021	1K	0.1597885	0.03204885	0.0420793
		2K	0.15735719	0.0212120363	0.0405668			2K	0.1595494	0.034081316	0.046342			2K	0.1612658	0.031096042	0.0421984
		3K	0.15722625	0.02141337	0.0405428			3K	0.156888025	0.03394224	0.045364			3K	0.15797531	0.03212582	0.0426031
		4K	0.16334438	0.030946633	0.037971			4K	0.164281769	0.03328275	0.046516			4K	0.161327294	0.032324075	0.0420157
		5K	0.165735881	0.030758725	0.0376333			5K	0.1756806	0.03002997	0.0458543			5K	0.173073688	0.021733316	0.0414259
Febrero	2021	6K	0.165607756	0.031699451	0.042645	Febrero	2021	6K	0.172998325	0.03389343	0.0477447	Febrero	2021	6K	0.170049675	0.03222582	0.0466149
		7K	0.166030831	0.031284419	0.040672			7K	0.168045506	0.032814416	0.0458832			7K	0.16197996	0.0257894	0.0466161
		8K	0.159053519	0.031814155	0.040457			8K	0.16094515	0.032955989	0.0445488			8K	0.15816715	0.021713115	0.0414888
		9K	0.164501069	0.031984961	0.0418093			9K	0.170284863	0.0334747	0.0465133			9K	0.162889328	0.031586647	0.0423046
		10K	0.167076	0.031623883	0.0411932			10K	0.17122338	0.03285721	0.0449281			10K	0.166173444	0.032103062	0.0413975
Marzo	2021	11K	0.170857925	0.031778872	0.0415672	Marzo	2021	11K	0.17267338	0.032277594	0.0420912	Marzo	2021	11K	0.167888994	0.031993517	0.0409725
		12K	0.16943231	0.031051449	0.0396965			12K	0.17431505	0.031333595	0.0393256			12K	0.167377763	0.030849405	0.0372998
		13K	0.16254013	0.031046591	0.0390916			13K	0.17466006	0.031765863	0.039247			13K	0.16408406	0.031188462	0.0372772
		14K	0.167801456	0.032033724	0.0429401			14K	0.173808205	0.032517225	0.043365			14K	0.16570475	0.03193232	0.042197
		15K	0.16837456	0.032056445	0.0417395			15K	0.176229331	0.032978199	0.0445349			15K	0.1667235	0.031461895	0.042676
Abril	2021	16K	0.1627072	0.032170049	0.0422813	Abril	2021	16K	0.17071331	0.032392499	0.048484	Abril	2021	16K	0.163149844	0.031986157	0.0398861
		17K	0.167801456	0.032033724	0.0429401			17K	0.173808205	0.032517225	0.043365			17K	0.16570475	0.03193232	0.042197
		18K	0.16837456	0.032056445	0.0417395			18K	0.176229331	0.032978199	0.0445349			18K	0.1667235	0.031461895	0.042676
		19K	0.1657075	0.031794768	0.0403346			19K	0.168975	0.03281311	0.0434365			19K	0.15936481	0.03246892	0.0407318
		20K	0.1627605	0.030504006	0.0398032			20K	0.16768663	0.030508262	0.0424831			20K	0.16120056	0.031689866	0.0395771
Mayo	2021	21K	0.161738463	0.031177469	0.0386109	Mayo	2021	21K	0.169733475	0.032223875	0.0419047	Mayo	2021	21K	0.160229898	0.031366551	0.0384349
		22K	0.16157015	0.032387474	0.043519			22K	0.1689755	0.03249421	0.0420003			22K	0.159936481	0.032079066	0.0401023
		23K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			23K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			23K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		24K	0.161837738	0.03299715	0.0458911			24K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			24K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		25K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			25K	0.168100306	0.032688215	0.0426541			25K	0.162130769	0.03225466	0.0408139
Junio	2021	26K	0.16226156	0.032486622	0.0437231	Junio	2021	26K	0.16513106	0.032597865	0.0427535	Junio	2021	26K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		27K	0.161837738	0.03299715	0.0458911			27K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			27K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		28K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			28K	0.168100306	0.032688215	0.0426541			28K	0.162130769	0.03225466	0.0408139
		29K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			29K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			29K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		30K	0.161837738	0.03299715	0.0458911			30K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			30K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
Julio	2021	31K	0.164281763	0.032631685	0.0440305	Julio	2021	31K	0.16513106	0.032597865	0.0427535	Julio	2021	31K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		32K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			32K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			32K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		33K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			33K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			33K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		34K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			34K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			34K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		35K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			35K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			35K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
Agosto	2021	36K	0.16226156	0.032486622	0.0437231	Agosto	2021	36K	0.16677713	0.032861238	0.0424244	Agosto	2021	36K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		37K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			37K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			37K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		38K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			38K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			38K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		39K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			39K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			39K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		40K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			40K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			40K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
Septiembre	2021	41K	0.164281763	0.032631685	0.0440305	Septiembre	2021	41K	0.16513106	0.032597865	0.0427535	Septiembre	2021	41K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		42K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			42K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			42K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		43K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			43K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			43K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		44K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			44K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			44K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		45K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			45K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			45K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
Octubre	2021	46K	0.16226156	0.032486622	0.0437231	Octubre	2021	46K	0.16677713	0.032861238	0.0424244	Octubre	2021	46K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		47K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			47K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			47K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		48K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			48K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			48K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		49K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			49K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			49K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		50K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			50K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			50K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
Noviembre	2021	51K	0.164281763	0.032631685	0.0440305	Noviembre	2021	51K	0.16513106	0.032597865	0.0427535	Noviembre	2021	51K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		52K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			52K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			52K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		53K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			53K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			53K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		54K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			54K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			54K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		55K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			55K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			55K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
Diciembre	2021	56K	0.16226156	0.032486622	0.0437231	Diciembre	2021	56K	0.16677713	0.032861238	0.0424244	Diciembre	2021	56K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		57K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			57K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			57K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		58K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			58K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			58K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
		59K	0.164281763	0.032631685	0.0440305			59K	0.16513106	0.032597865	0.0427535			59K	0.159815344	0.031961622	0.0401938
		60K	0.16226156	0.032486622	0.0437231			60K	0.16677713	0.032861238	0.0424244			60K	0.160245944	0.031745643	0.0427362
Enero	2022	39K	0.1539075	0.020580362	0.037578	Enero	2022	39K	0.15277488	0.020178916	0.0338988	Enero	2022	39K	0.150679	0.029882043	0.0292905
		38K	0.154956169	0.028938037	0.0327161			38K	0.15684719	0.0252621	0.0405671			38K	0.152907106	0.02843112	0.0292084
		37K	0.154956169	0.028938037	0.0327161			37K	0.159551825	0.028405378	0.0330459			37K	0.15906731	0.028803427	0.0277794
		36K	0.157744756	0.028523576	0.0310492			36K	0.159551825	0.028405378	0.0330459			36K	0.15906731	0.028803427	0.0277794
		35K	0.161791956	0.020787266	0.0384001			35K	0.16357631	0.0208816672	0.0340967			35K	0.157517163	0.0293671507	0.0335021
Febrero	2022	40K	0.154287738	0.02937077	0.0343171	Febrero	2022	40K	0.15269275	0.029849157	0.0349553	Febrero	2022	40K	0.151295181	0.029457742	0.0332303
		41K	0.163398181	0.032350879	0.0450753			41K	0.159942106	0.031321206	0.0421641			41K	0.155939344	0.02179765	0.0408863
		42K	0.163398181	0.032350879	0.0450753			42K	0.159942106	0.031321206	0.0421641			42K	0.155939344	0.02179765	0.0408863
		43K	0.163398181	0.032350879	0.0450753			43K	0.159942106	0.031321206	0.0421641			43K	0.155939344	0.02179765	0.0408863
		44K	0.16														

Posterior a eso, se realizó una gráfica para la altura promedio contra la cantidad de piezas producidas, así como una gráfica de la desviación estándar promedio contra la cantidad de piezas producidas. Este procedimiento se realizó para cada una de las 3 posiciones del estencil. La razón de realizar este procedimiento fue la de evaluar de manera gráfica, el comportamiento de cada una de las posiciones de impresión de pasta contra la cantidad de unidades producidas, con el fin de validar que todas las posiciones siguieran tendencias similares.

Utilizando la función de análisis de regresión de Microsoft Excel, se realizó un análisis preliminar, buscando encontrar la posición cuyas gráficas tuvieran mejor coeficiente de determinación (R^2), el cual es un indicador de la medida en la que el modelo puede explicar la variación de una variable dependiente en función de una variable independiente. El coeficiente de determinación va de 0% a 100%, donde el 100% indica que toda la variación de la variable dependiente puede atribuirse a la variable independiente. Por lo tanto, se busca obtener la ecuación que arroje el mayor coeficiente de determinación posible.

En la tabla 5.2. se ejemplifica el análisis gráfico de las tres posiciones de impresión del estencil. En el primer renglón, se encuentran las gráficas de la altura de pasta promedio por posición de impresión. En el segundo renglón, se encuentran las gráficas de desviación estándar de la altura.

Puede observarse que la línea de regresión de cada una de ellas sigue un comportamiento similar. Esto a su vez, permite asumir que el uso de una sola ecuación de regresión será capaz de describir adecuadamente el comportamiento de las 3 posiciones.

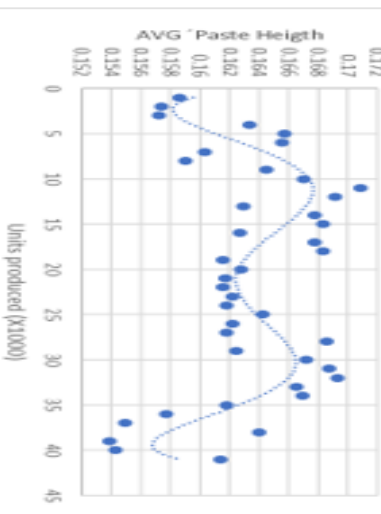
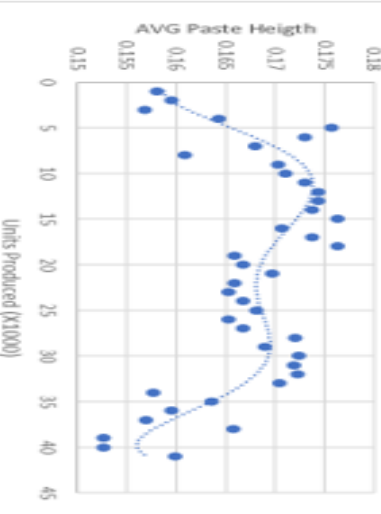
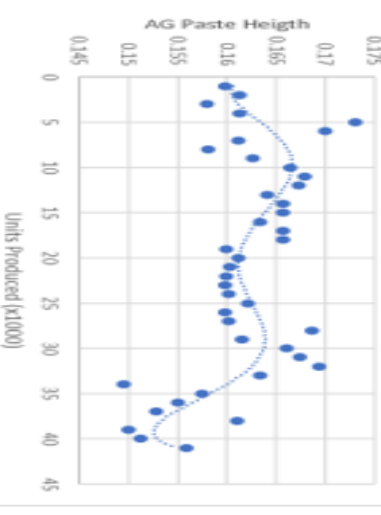
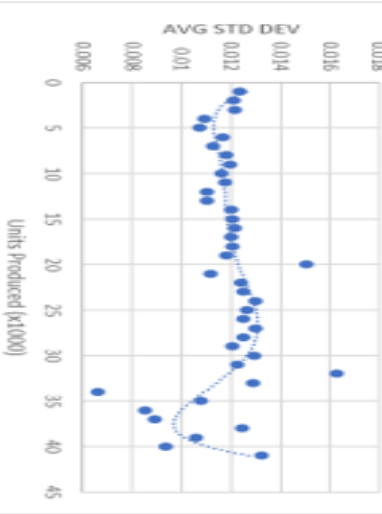
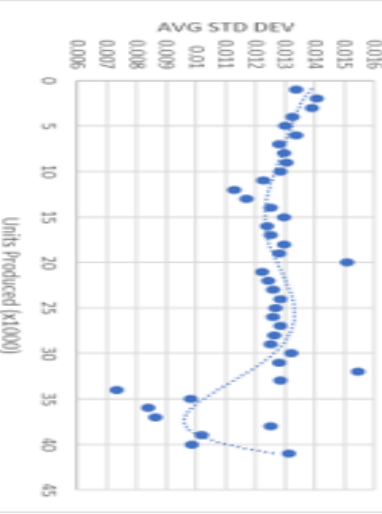
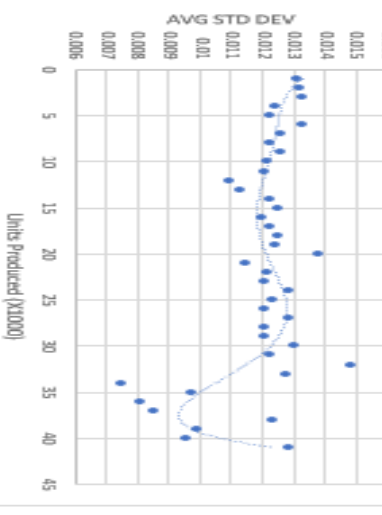
Posición 1- Altura de impresión de pasta promedio	Posición 2- Altura de impresión de pasta promedio	Posición 3- Altura de impresión de pasta promedio
AVG Height P1 $y = 1E-09x^4 - 1E-07x^3 + 7E-06x^2 - 0.0002x + 0.0015x^2 - 0.0047x + 0.1629$ $R^2 = 0.5294$ 	AVG Height P2 $y = 1E-09x^4 - 1E-07x^3 + 6E-06x^2 - 0.0001x^2 + 0.0011x^2 - 0.0018x + 0.1597$ $R^2 = 0.6333$ 	AVG Height P3 $y = 1E-09x^4 - 1E-07x^3 + 5E-06x^2 - 0.0001x^2 + 0.0009x^2 - 0.0021x + 0.1619$ $R^2 = 0.4947$ 
STD dev Height P1 $y = 3E-10x^4 - 3E-08x^3 + 1E-06x^2 - 3E-05x^2 + 0.0003x^2 - 0.0014x + 0.0138$ $R^2 = 0.3279$ 	STD dev Height P2 $y = 2E-10x^4 - 2E-08x^3 + 7E-07x^2 - 1E-05x^2 + 9E-05x^2 - 0.0004x + 0.0142$ $R^2 = 0.4888$ 	STD dev Height P3 $y = 2E-10x^4 - 2E-08x^3 + 9E-07x^2 - 2E-05x^2 + 0.0001x^2 - 0.0007x + 0.0139$ $R^2 = 0.4737$ 

Tabla 5.2. Análisis gráfico de los modelos de regresión por posición de impresión.

Una vez realizado este análisis se encontró que la posición 2 presentaban el mejor nivel de ajuste, tanto en altura como en desviación estándar, siguiendo ambos casos una distribución basada en el uso de ecuaciones polinómicas. Una vez definido esto, se tomó la decisión de acotar el estudio a la posición 2.

El hecho de que la posición 2 muestre el comportamiento más estable probablemente se deba a que es la posición central del estencil, donde la posición 1 se encuentra en el extremo izquierdo de este herramental y la posición 3 en el extremo derecho. Si bien estas posiciones cuentan con soporte, pudieran ser proclives a presentar flexión al ser presionadas por el *squeegee*.

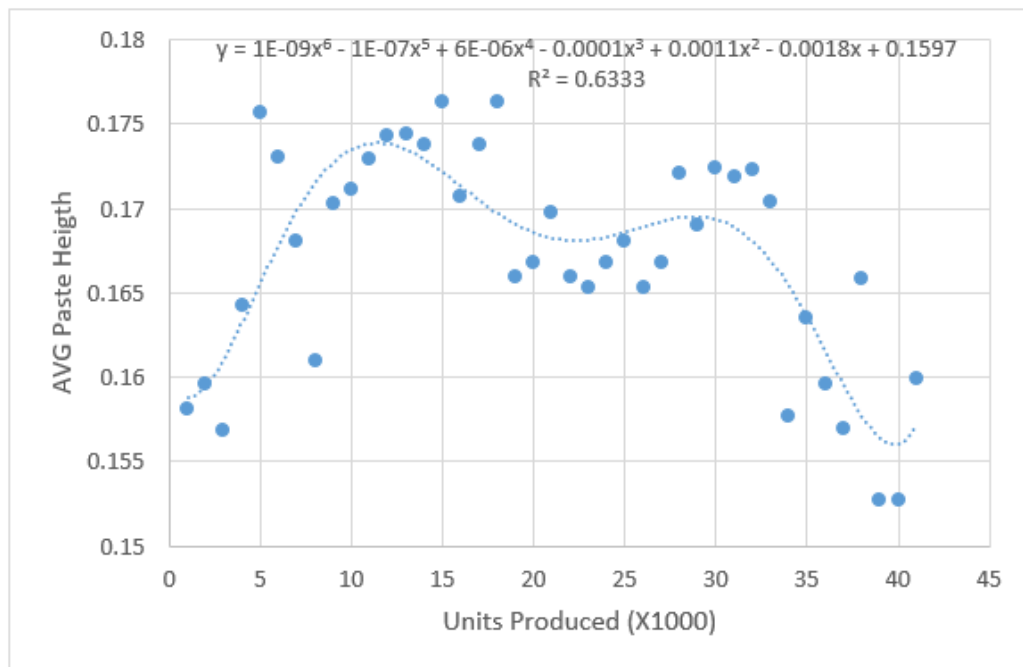


Imagen 5.1. Gráfica de regresión para altura promedio de pasta en posición 2.

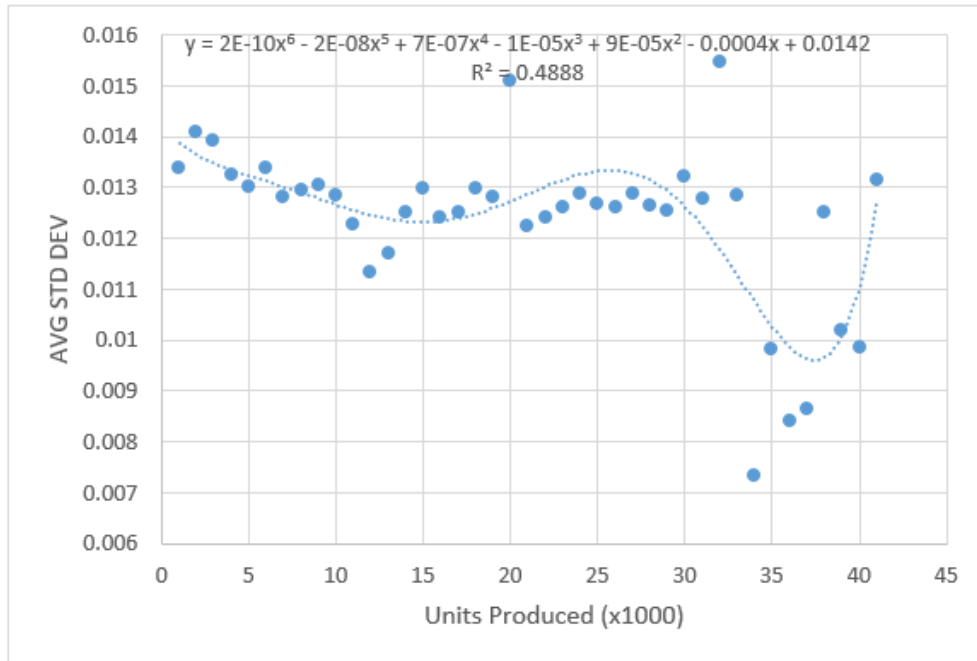


Imagen 5.2. Gráfica de regresión para desviación estándar promedio de la altura de pasta en posición 2.

Una vez acotado el estudio a la posición 2, se utilizó el software *Curve Expert* con el fin de encontrar si existía una distribución que presentara un mejor nivel de ajuste. Para ambos casos se corroboró que el modelo basado en ecuaciones polinómicas es el más representativo de este sistema (Imagen 5.3 y 5.4).

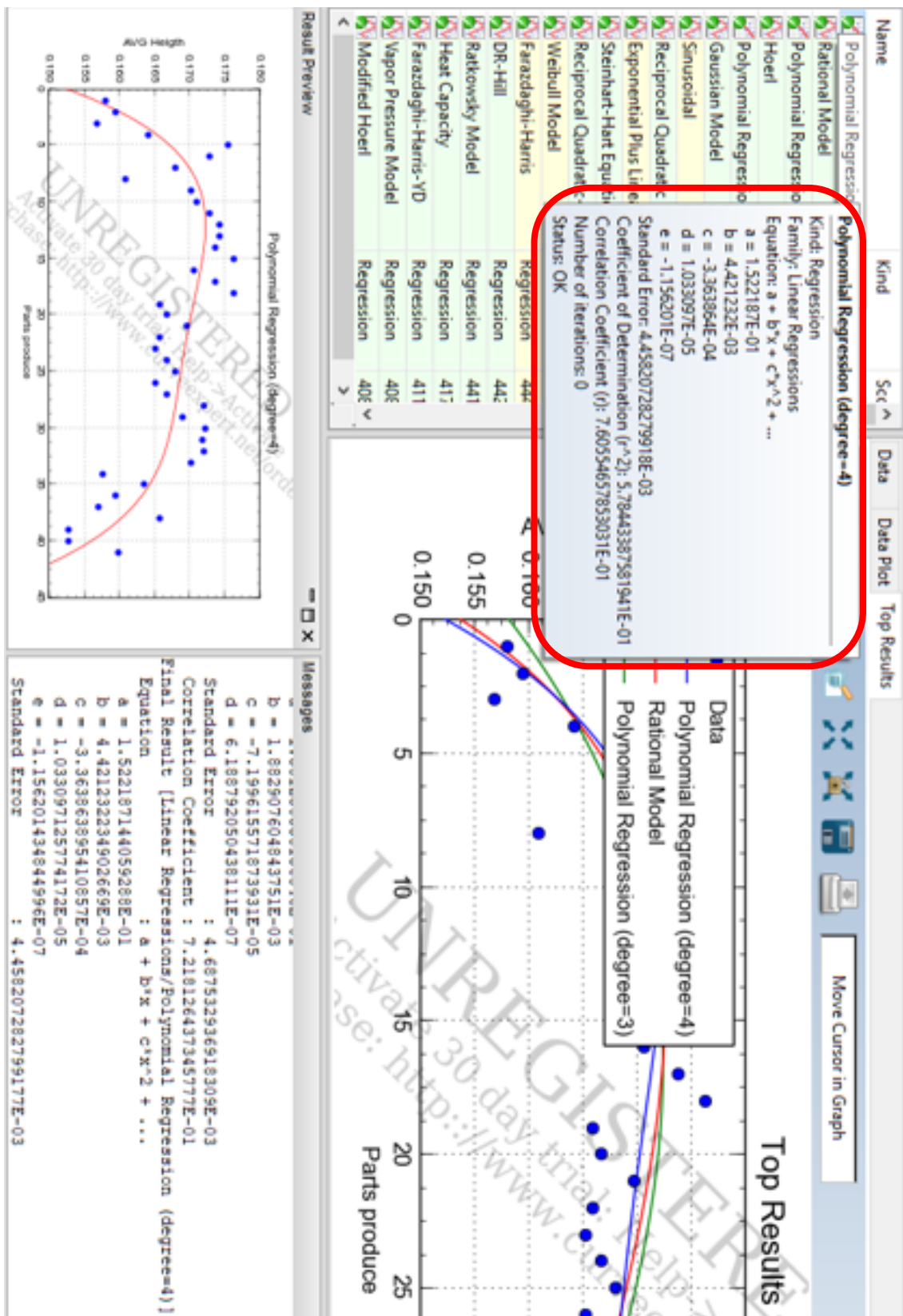


Imagen 5.3. Optimización de ajuste en Curve Expert para altura promedio. Señalada en rojo se representa la ecuación de regresión sugerida por el software.

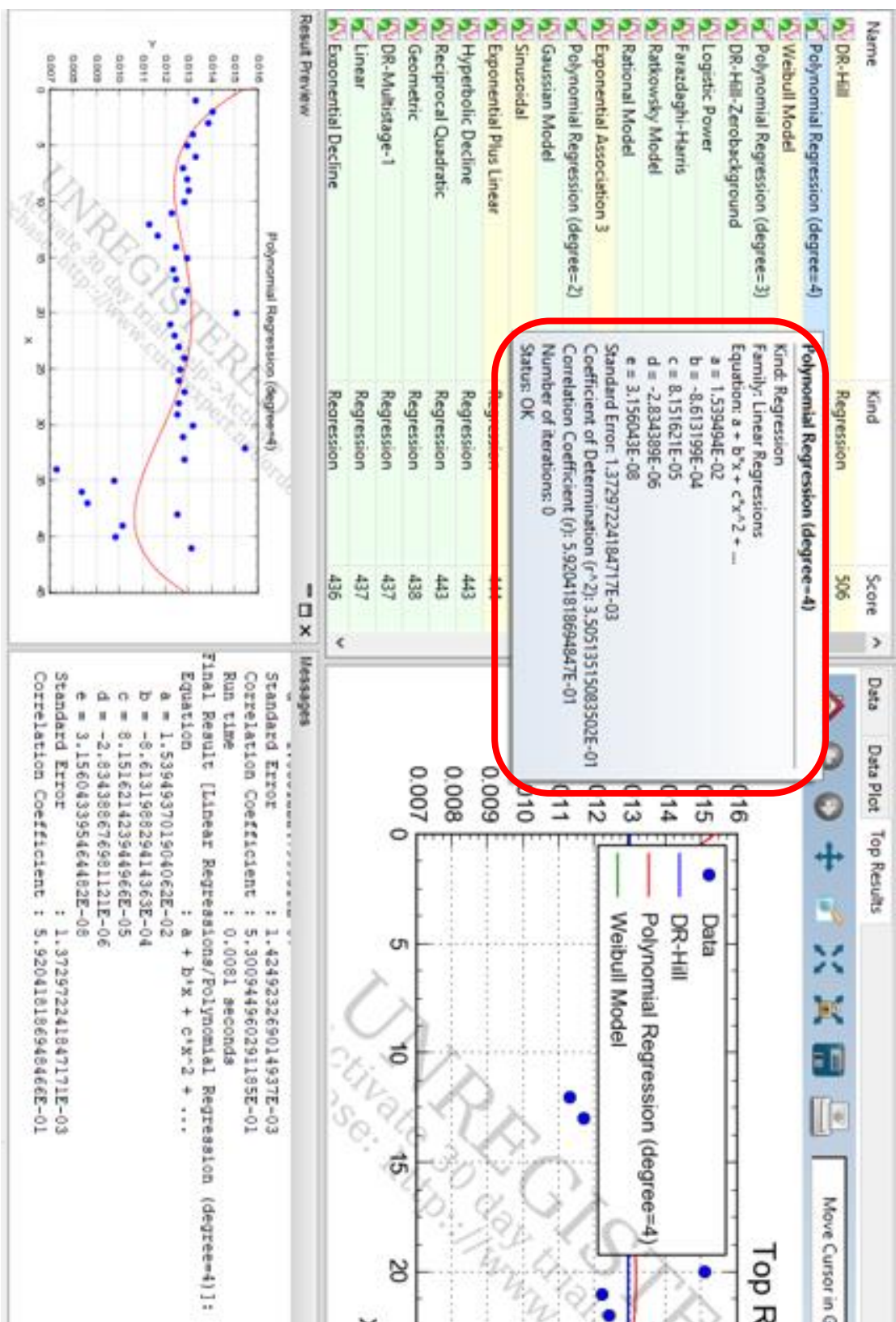


Imagen 5.4 Optimización de ajuste en Curve Expert para desviación estándar promedio. Señalada en rojo se representa la ecuación de regresión sugerida por el software.

5.1.1. Uso de Minitab para el modelo de altura promedio.

Inicialmente se buscó utilizar el modelo polinómico de 4to orden, tal como fue recomendado por *Curve Expert*, sin embargo, este modelo fue desechado ya que el Software *Minitab* no fue capaz de arrojar un valor de bondad de ajuste, por lo que no fue posible determinar la validez estadística del modelo (Imagen 5.5.)

```
Lack of Fit

There are no replicates.
Minitab cannot do the lack of fit test based on pure error.
```

Imagen 5.5. Bondad de ajuste no calculada.

Una vez desechado el modelo polinómico, se tomó la decisión de utilizar un modelo cuadrático. La validez estadística del mismo fue comprobada basándose en un análisis de varianza (ANOVA), donde el *P value* fue menor al nivel de confianza del 95% utilizado para este ejercicio (Imagen 5.6).

Analysis of Variance						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Regression	2	0.0008579	0.0004290	19.42	0.000	
Error	38	0.0008394	0.0000221			
Total	40	0.0016973				

Imagen 5.6. Validez estadística del modelo.

El uso de un modelo cuadrático arrojó un coeficiente de determinación R^2 ajustado de 47.9%, lo cual indica que el 47.9% de la variación en altura de la pasta puede ser explicada por la cantidad de piezas producidas. De igual manera, se encontró la ecuación que describe el modelo de regresión (Imagen 5.7).

The regression equation is

$$\text{Paste average height} = 0.1606 + 0.001220 \text{ Produced parts} - 0.000033 \text{ Produced parts}^2$$

$$S = 0.00470000 \quad R\text{-Sq} = 50.5\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 47.9\%$$

Imagen 5.7. Ecuación de regresión y coeficiente de determinación ajustado.

Realizando un análisis gráfico, podemos observar que los residuales se encuentran distribuidos de manera aleatoria por arriba y debajo de la línea (heterocedasticidad) lo cual indica que no hay tendencias anómalas que pudieran indicar una contaminación de los datos utilizados en el análisis (Imagen 5.8).

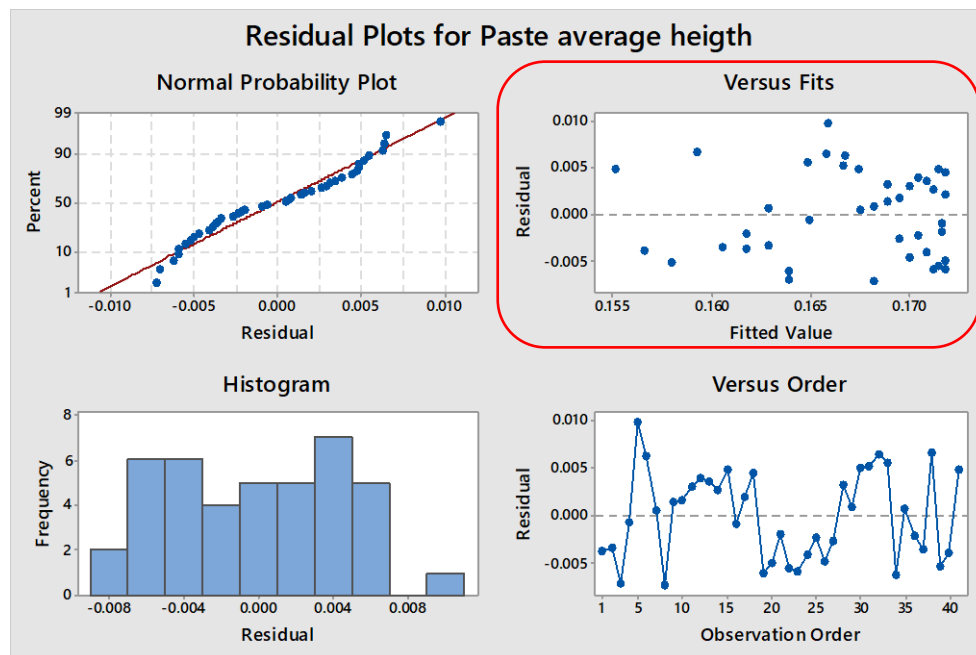


Imagen 5.8. Evidencia de heterocedasticidad.

Finalmente, puede observarse que el modelo cuadrático muestra una subida inicial de los valores de altura (la cual sucede hasta el rango de las 20000 piezas producidas) que puede explicarse debido al tiempo de aclimatación de un nuevo herramental, seguida por una tendencia a la baja, la cual pudiera explicarse debido al desgaste que el esténcil sufre debido a la fricción del *squeegee* en cada ciclo de impresión (Imagen 5.9). Esta tendencia está alineada con la hipótesis propuesta en este trabajo, en la que se postula

que la variación en la altura de impresión de pasta puede calcularse en función de las piezas producidas.

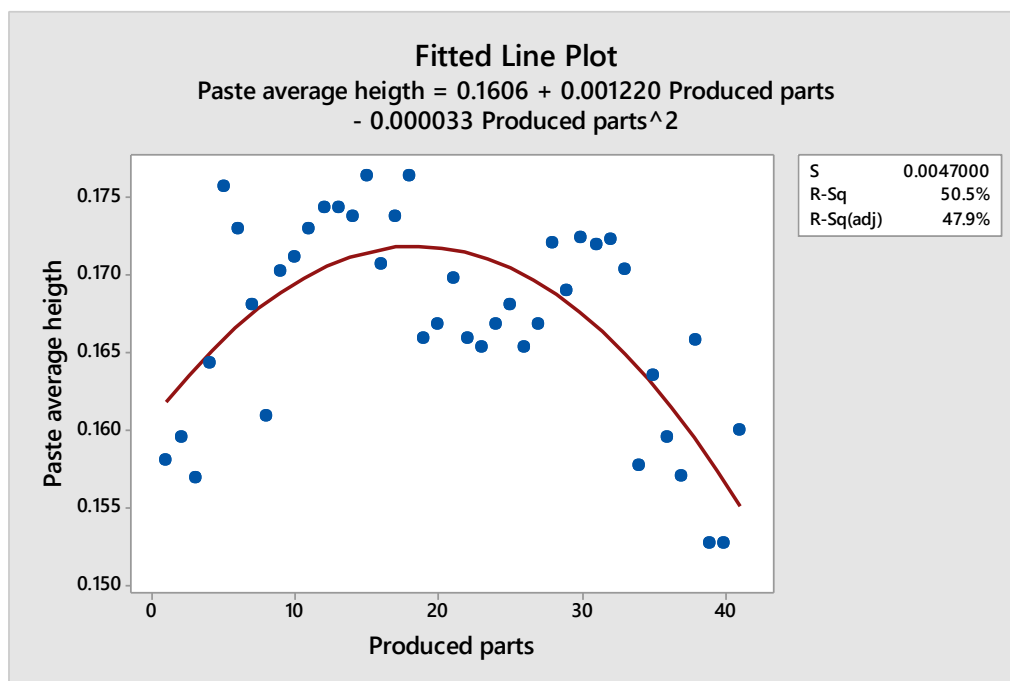


Imagen 5.9. Gráfica de regresión ajustada.

Utilizando la ecuación del modelo, fue posible hacer una predicción del comportamiento futuro de la altura de impresión de pasta, donde se puede observar que el valor promedio de la altura de impresión de pasta pasará el límite inferior de especificación ($127\mu\text{m}$) entre las 55000 y 56000 piezas producidas (Imagen 5.10).

Es importante notar que el valor promedio de la altura de impresión de pasta no puede tomarse como único indicador de desgaste del estencil, ya que implicaría tener hasta un 50% de desperdicio en una situación de producción real. Por lo tanto, el autor considera necesario tomar en cuenta la interacción del valor promedio con la desviación estándar de los datos, de manera que la predicción pueda considerar un factor de protección que esté alineado con los métricos de scrap de Continental (0.05% de scrap es considerado un valor aceptable). Es por esto por lo que en el

siguiente capitulo se describe la metodología utilizada para la creación de un modelo predictivo de la desviación estándar de los datos.

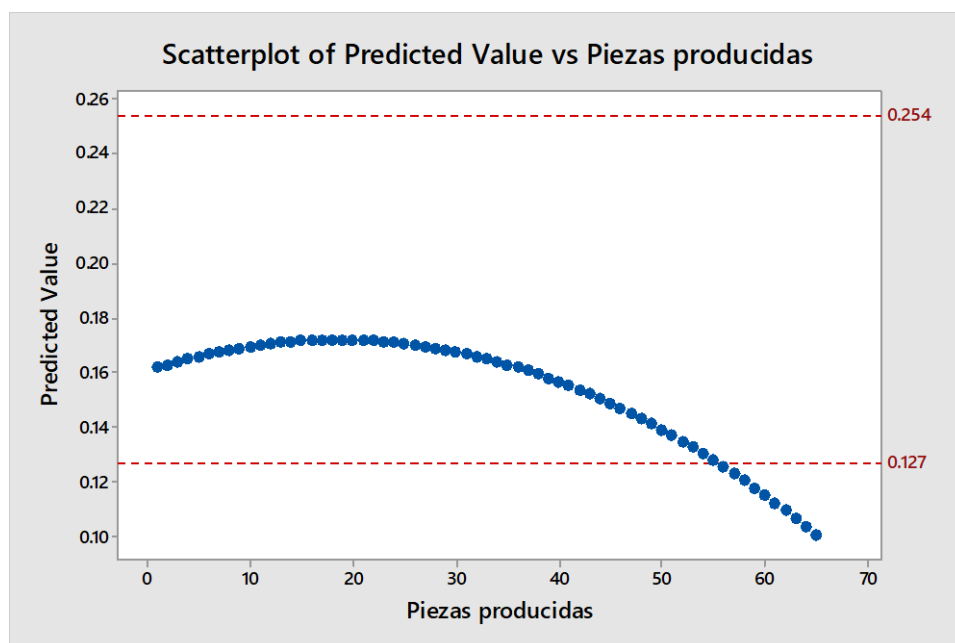


Imagen 5.10. Predicción de tendencia de altura de pasta

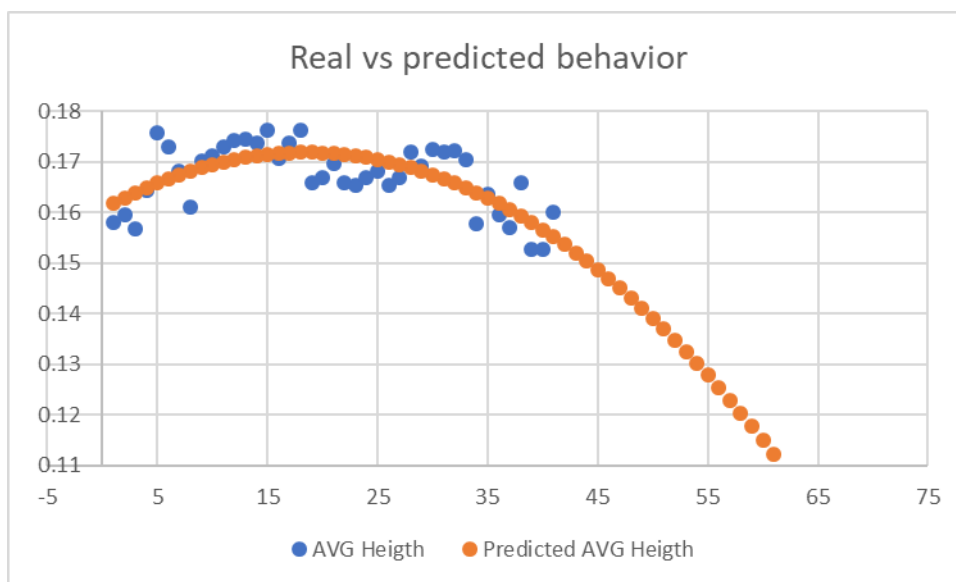


Imagen5.11. Valor real contra valor predicho

5.1.2. Uso de Minitab para el modelo de desviación estándar promedio.

Para la generación de un modelo de regresión para la desviación estándar promedio se utilizó un acercamiento similar al utilizado en el de la altura promedio. Inicialmente se buscó utilizar un modelo basado en una ecuación polinómica del cuarto orden, sin embargo, no fue posible obtener evidencia de la bondad de ajuste del modelo, por lo que esta opción fue descartada.

Posterior a esto, se realizó un análisis gráfico del comportamiento de la desviación estándar promedio contra las piezas producidas, encontrándose evidencia de que, a partir de las 33000 piezas producidas, la desviación estándar promedio comienza a seguir un comportamiento errático, es decir, la variación en la desviación estándar promedio es mucho mayor después de este punto, cuando se compara con su comportamiento previo (imagen 5.12.)

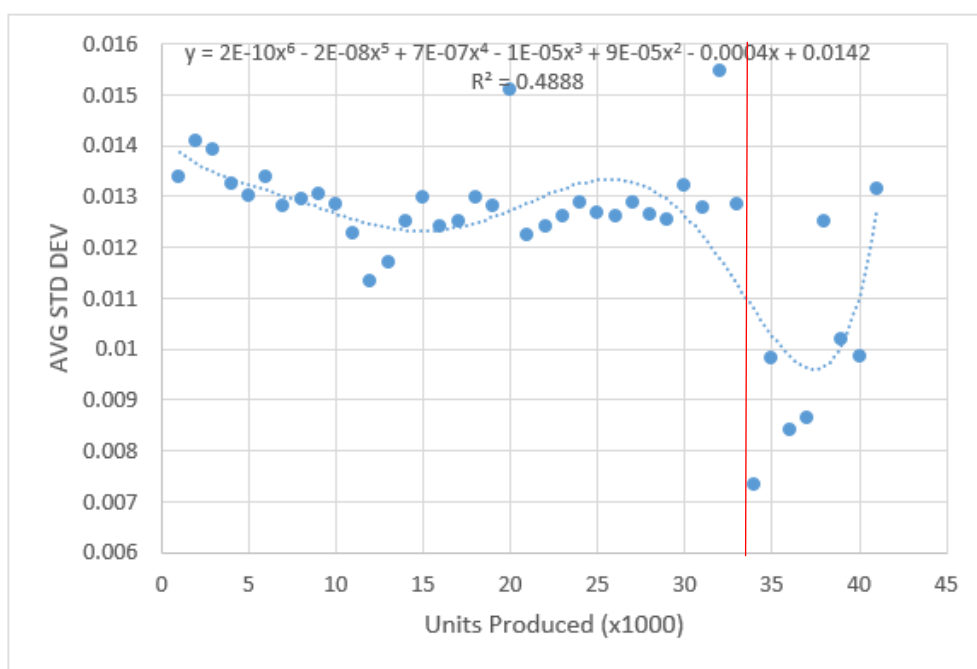


Imagen 5.12. Variación en el comportamiento de la desviación estándar promedio.

Esto lleva a la hipótesis de que, a partir de las 33000 piezas producidas, sucede un cambio en el comportamiento del herramental, por lo que los datos después de este punto ya no pueden ser tratados de igual manera que los datos antes del mismo. Esta

hipótesis fue corroborada mediante la realización de una prueba de T de Student, la cual es una prueba diseñada para “examinar las diferencias entre dos muestras independientes y pequeñas que tengan distribución normal y homogeneidad en sus varianzas” (Sanchez Turcios, 2015). Para esto se utilizó un nivel de confianza del 95%, en el cual podemos observar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos, la cual queda evidenciada por el *P-Value* de 0.004 (Imagen 5.13.). Por lo tanto, se decidió acotar el modelado de la regresión a los datos generados después de las 33000 piezas.

Paired T-Test and CI: Piezas <33000, Piezas>33000

Paired T for Piezas <33000 - Piezas>33000

	N	Mean	StDev	SE Mean
Piezas <33000	8	0.013342	0.000450	0.000159
Piezas>33000	8	0.009983	0.001993	0.000705
Difference	8	0.003359	0.002240	0.000792

95% CI for mean difference: (0.001487, 0.005231)

T-Test of mean difference = 0 (vs ≠ 0): T-Value = 4.24

P-Value = 0.004

Imagen 5.13. Prueba de T para desviación estándar promedio antes y después de las 33000 piezas producidas.

Una vez acotado el rango de datos a analizar, se procedió a realizar un análisis de regresión, encontrándose que una ecuación linear basta para describir este modelo, contando con validez estadística a un 95% de confianza (Imagen 5.14.), con un coeficiente de determinación R^2 ajustada de 45.72% (Imagen 5.15.). La ecuación del modelo está descrita en la imagen 5.16. Es importante notar que, con base en el análisis gráfico de la tabla 5.2. esta ecuación puede ser considerada como representativa del comportamiento de las 3 posiciones de impresión de pasta.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	0.000015	0.000015	6.90	0.039
Parts produced	1	0.000015	0.000015	6.90	0.039
Error	6	0.000013	0.000002		
Total	7	0.000028			

Imagen 5.14. Validez estadística del modelo.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0014682	53.48%	45.72%	20.37%

Imagen 5.15. Coeficiente de determinación ajustado del modelo.

Regression Equation

$$Y = -0.01233 + 0.000595 X$$

Imagen 5.16. Ecuación de regresión del modelo.

5.1.3. Integración de los modelos de altura promedio y desviación estándar promedio.

Con el fin de optimizar el uso del análisis de regresión como una herramienta predictiva para el tiempo de vida del estencil de la plataforma MGH100 ESC GEM, es imperativa la integración de los modelos de altura promedio y desviación estándar promedio en una sola herramienta. Esto es debido a que si bien, quedó demostrado que mediante el análisis de regresión se puede saber en qué punto de la producción el valor promedio de las piezas será menor al límite inferior de especificación, el porcentaje de fallas que se registrarían en ese punto haría que no sea económicamente viable utilizar este herramental.

Por lo antes mencionado, al tener dos modelos matemáticos, uno que predice la altura de impresión de pasta promedio en un punto dado, y otro que predice la desviación estándar de la altura promedio de impresión de pasta, es posible el utilizar la

interacción entre ambos modelos para obtener un valor Z, el cual, a su vez, puede ser utilizado para obtener un estimado de la cantidad de piezas fuera de especificación en un punto dado de piezas totales producidas (Tabla 5.2).

Produced parts (X1000)	Predicted AVG Heigth	Predicted STD DEV	Z value
34	0.16391464	0.0079	-4.672739241
35	0.1628576	0.008495	-4.221024132
36	0.16173456	0.00909	-3.821183718
37	0.16054552	0.009685	-3.463657202
38	0.15929048	0.01028	-3.141097276
39	0.15796944	0.010875	-2.847764598
40	0.1565824	0.01147	-2.579110724
41	0.15512936	0.012065	-2.331484459
42	0.15361032	0.01266	-2.101921011
43	0.15202528	0.013255	-1.887987929
44	0.15037424	0.01385	-1.687670758
45	0.1486572	0.014445	-1.499286951
46	0.14687416	0.01504	-1.321420213
47	0.14502512	0.015635	-1.152869843
48	0.14311008	0.01623	-0.992611214
49	0.14112904	0.016825	-0.839764636
50	0.139082	0.01742	-0.693570608
51	0.13696896	0.018015	-0.553369969
52	0.13478992	0.01861	-0.418587856
53	0.13254488	0.019205	-0.288720646
54	0.13023384	0.0198	-0.163325253
55	0.1278568	0.020395	-0.042010297
56	0.12541376	0.02099	0.075571224
57	0.12290472	0.021585	0.189728052
58	0.12032968	0.02218	0.300735798
59	0.11768864	0.022775	0.408841273
60	0.1149816	0.02337	0.514266153
61	0.11220856	0.023965	0.617210098
62	0.10936952	0.02456	0.71785342
63	0.10646448	0.025155	0.816359372
64	0.10349344	0.02575	0.912876117
65	0.1004564	0.026345	1.007538432
66	0.09735336	0.02694	1.100469191
67	0.09418432	0.027535	1.191780643
68	0.09094928	0.02813	1.281575542
69	0.08764824	0.028725	1.369948129
70	0.0842812	0.02932	1.456984993
71	0.08084816	0.029915	1.542765837
72	0.07734912	0.03051	1.627364143
73	0.07378408	0.031105	1.710847774
74	0.07015304	0.0317	1.793279495
75	0.066456	0.032295	1.874717449
76	0.06269296	0.03289	1.955215567
77	0.05886392	0.033485	2.034823951
78	0.05496888	0.03408	2.113589202
79	0.05100784	0.034675	2.191554722
80	0.0469808	0.03527	2.268760987
81	0.04288776	0.035865	2.345245783
82	0.03872872	0.03646	2.421044432
83	0.03450368	0.037055	2.496189988
84	0.03021264	0.03765	2.570713413
85	0.0258556	0.038245	2.644643744
86	0.02143256	0.03884	2.718008239
87	0.01694352	0.039435	2.790832509
88	0.01238848	0.04003	2.863140645
89	0.00776744	0.040625	2.934955323
90	0.0030804	0.04122	3.006297914

Tabla 5.2. Obtención de valor Z mediante la interacción de ambos modelos.

Ejemplificando: al tomar una cantidad de piezas producidas de 45000, se obtiene un valor Z de -1.49, el cual indica que se tendrá un 6.81% de piezas fuera de especificación (Imagen5.17).

Produced parts (x1000)	Predicted AVG Heighth	Predicted STD DEV	Z Value
45	0.1486572	0.014445	-1.499287

TABLA A: Probabilidades de la normal estándar										
z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-3.4	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0002
-3.3	.0005	.0005	.0005	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0003
-3.2	.0007	.0007	.0006	.0006	.0006	.0006	.0006	.0005	.0005	.0005
-3.1	.0010	.0009	.0009	.0009	.0008	.0008	.0008	.0008	.0007	.0007
-3.0	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0011	.0011	.0010	.0010
-2.9	.0019	.0018	.0018	.0017	.0016	.0016	.0015	.0015	.0014	.0014
-2.8	.0026	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021	.0020	.0019
-2.7	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028	.0027	.0026
-2.6	.0047	.0045	.0044	.0043	.0041	.0040	.0039	.0038	.0037	.0036
-2.5	.0062	.0060	.0059	.0057	.0055	.0054	.0052	.0051	.0049	.0048
-2.4	.0082	.0080	.0078	.0075	.0073	.0071	.0069	.0068	.0066	.0064
-2.3	.0107	.0104	.0102	.0099	.0096	.0094	.0091	.0089	.0087	.0084
-2.2	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
-2.1	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
-2.0	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
-1.9	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
-1.8	.0359	.0351	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
-1.7	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
-1.6	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
-1.5	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
-1.4	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0721	.0708	.0694	.0681
-1.3	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
-1.2	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985

Imagen 5.17. Uso de tabla Z para cálculo de porcentaje de piezas fuera de especificación.

Asumiendo que durante el punto de tiempo en el que se llegue a las 45000 piezas producidas, se tenga planeada una producción de 3000 unidades, con un valor de 50 MXN, se obtendría un costo estimado de *scrap* de 10215 MXN (Imagen 5.18.).

Basado en el costo de *scrap*, la gerencia de Continental La Tijera podrá tomar decisiones sobre la viabilidad económica de este herramental, así como la implementación de un punto de reorden adecuado para evitar que se llegue a un punto en el cual un esténcil deja de ser económicamente viable. Es importante notar que estos datos son basados en una simulación, por lo que es será necesario el discutir la implementación de esta metodología en piso de producción.

5.2.- Impacto de la estrategia en el objetivo de estudio

Debido a limitantes técnicas en la recolección de datos (tamaño de muestra acotado a 3000 ciclos de trabajo por mes) el análisis de cada unidad producida no es factible. Por otro lado, el uso del análisis de regresión permite hacer inferencias sobre las unidades no analizadas, por lo que esta situación no presenta una mayor afectación a los resultados del análisis.

Sin embargo, esta limitante técnica significa que no es posible establecer una correlación 1:1 entre las unidades producidas y las unidades simuladas, (es decir, que cada unidad representada en la gráfica de simulación corresponda a una unidad real). Esto es debido a que la cantidad de datos que es técnicamente posible recolectar en un periodo mensual está limitado a 3000 paneles (considerar que cada panel corresponde a 3 unidades terminadas, es decir, 9000 piezas), mientras que la producción real de la plataforma MGH100 ESC es de 10563 unidades mensuales en promedio. Es importante notar que este valor se obtuvo monitoreando la variación en la demanda semanal para estos productos durante el último año. Si bien, esto no es un impedimento para la validez estadística del modelo, ya que el tamaño de muestra seleccionado es estadísticamente significativo, si implica que una unidad producida en el modelo tendrá un ligero desfase en la dimensión de tiempo contra una unidad producida en el mundo real. Sin embargo, este inconveniente puede corregirse fácilmente obteniendo la equivalencia de piezas producidas en “el mundo real” contra las piezas del modelo teórico. Esta equivalencia es descrita a detalle en el capítulo 5.3.

De igual manera, es importante considerar la interacción de un modelo meramente matemático con la realidad de una línea de producción, donde no siempre resulta posible el dejar de producir para realizar un cambio de esténcil, esto debido a la existencia de contratos comerciales con los clientes de Continental, en los que es

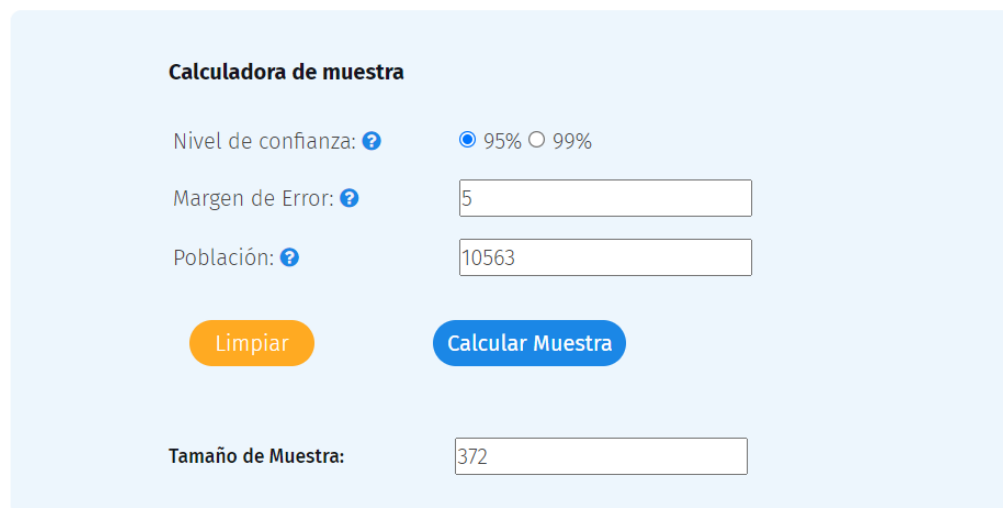
necesario mantener una salida constante de producto terminado, de manera que no exista el riesgo de un paro de línea. Es por esto que el autor propone un ajuste al modelo matemático. Este ajuste consiste en los siguientes puntos:

- Tomar como base para la toma de decisión de cambio de herramental un periodo en semanas de uso del herramental, en vez de piezas producidas.
- El pronóstico en semanas se realiza en función de la predicción de la demanda, asumiendo una demanda semanal de 10563 Piezas.

5.3. Ajuste del modelo predictivo

Con el fin de ajustar el modelo a la realidad de la producción en series de la plataforma MGH100 ESC, las siguientes consideraciones fueron tomadas:

- La cantidad máxima de datos que es posible recopilar, con base mensual en la base de datos del equipo de inspección de pasta, es de 3000 paneles, lo cual equivale a 9000 unidades terminadas.
- La producción semanal. promedio de la plataforma MGH100 es de 10563 unidades.
- El tamaño de muestra utilizado es estadísticamente valido, utilizando un 95% de confianza (Imagen 5.18).



The image shows a web-based calculator titled "Calculadora de muestra". It has the following fields and controls:

- Nivel de confianza:** Two radio buttons are present, with "95%" selected and "99%" unselected.
- Margen de Error:** A text input field containing the value "5".
- Población:** A text input field containing the value "10563".
- Buttons:** There are two buttons: an orange "Limpiar" button and a blue "Calcular Muestra" button.
- Tamaño de Muestra:** A text input field at the bottom showing the calculated result "372".

Imagen 5.18. Cálculo de tamaño de muestra

- Por lo tanto, podemos asumir que 1 unidad producida en el modelo matemático corresponde a 4.69 unidades producidas en la realidad (tabla 5.3).

Real life data	Average weekly production (pieces)	10562.5
	Average weekly production (panels)	3520.833
	Average monthly production (pieces)	42250
	Average monthly production (panels)	14083.33
Predictive model data	Monthly production (Panel)	3000
	Monthly production (Pieces)	9000
	Conversion factor (real life data/ predictive model data)	4.694444

Tabla 5.3 Cálculo de factor de conversión

- La meta de scrap definida en Continental La Tijera es del 0.42%, por lo que este es definido como el valor máximo de scrap que puede generarse por concepto de fallas en *Solder Paste Inspection* antes de tener que cambiar el herramental. (Imagen 5.19)



Imagen 5.19. Meta de scrap para plataforma MGH100 ESC

Habiendo establecido los puntos anteriormente mencionados, se procedió a encontrar el valor en la tabla Z más cercano a 0.42% de material defectivo, siempre y cuando no excediera este número, ya que esto implicaría exceder el objetivo de scrap. Se encontró que el valor más cercano es -3.71, el cual equivale a un 0.41% de material defectuoso (tabla 5.4).

z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
-5	1.48672E-06	1.4141E-06	1.345E-06	1.2791E-06	1.2162E-06	1.1564E-06	1.0994E-06	1.0451E-06	9.9339E-07	9.4414E-07
-4.9	2.43896E-06	2.3222E-06	2.2108E-06	2.1046E-06	2.0033E-06	1.9066E-06	1.8144E-06	1.7265E-06	1.6428E-06	1.5629E-06
-4.8	3.9613E-06	3.7755E-06	3.598E-06	3.4285E-06	3.2667E-06	3.1122E-06	2.9647E-06	2.8239E-06	2.6895E-06	2.5613E-06
-4.7	6.36983E-06	6.0771E-06	5.7972E-06	5.5296E-06	5.2739E-06	5.0295E-06	4.796E-06	4.5728E-06	4.3596E-06	4.1559E-06
-4.6	1.01409E-05	9.6845E-06	9.2477E-06	8.8297E-06	8.4298E-06	8.0472E-06	7.6812E-06	7.3311E-06	6.9962E-06	6.676E-06
-4.5	1.59837E-05	1.528E-05	1.4605E-05	1.3959E-05	1.334E-05	1.2747E-05	1.218E-05	1.1636E-05	1.1116E-05	1.0618E-05
-4.4	2.49425E-05	2.3868E-05	2.2837E-05	2.1848E-05	2.09E-05	1.9992E-05	1.9121E-05	1.8286E-05	1.7486E-05	1.6719E-05
-4.3	3.85352E-05	3.6911E-05	3.5353E-05	3.3856E-05	3.242E-05	3.1041E-05	2.9719E-05	2.8449E-05	2.7231E-05	2.6063E-05
-4.2	5.89431E-05	5.6516E-05	5.4183E-05	5.1942E-05	4.9788E-05	4.7719E-05	4.5731E-05	4.3821E-05	4.1988E-05	4.0226E-05
-4.1	8.92617E-05	8.5672E-05	8.2218E-05	7.8895E-05	7.57E-05	7.2626E-05	6.967E-05	6.6828E-05	6.4095E-05	6.1468E-05
-4	0.00013383	0.00012858	0.00012352	0.00011864	0.00011395	0.00010943	0.00010509	0.0001009	9.687E-05	9.2993E-05
-3.9	0.000198655	0.00019105	0.00018371	0.00017664	0.00016983	0.00016326	0.00015693	0.00015083	0.00014495	0.00013928
-3.8	0.000291947	0.00028105	0.00027053	0.00026037	0.00025058	0.00024113	0.00023201	0.00022321	0.00021473	0.00020655
-3.7	0.00042478	0.00040933	0.0003944	0.00037998	0.00036605	0.0003526	0.0003396	0.00032705	0.00031494	0.00030324
-3.6	0.000611902	0.00059024	0.00056928	0.00054901	0.00052941	0.00051046	0.00049214	0.00047443	0.00045731	0.00044077
-3.5	0.000872683	0.00084263	0.00081352	0.00078534	0.00075807	0.00073166	0.00070611	0.00068138	0.00065745	0.0006343
-3.4	0.001232219	0.00119097	0.00115098	0.00111223	0.00107467	0.00103828	0.00100302	0.00096886	0.00093577	0.00090372
-3.3	0.001722569	0.00166657	0.00161223	0.0015595	0.00150835	0.00145873	0.0014106	0.00136393	0.00131866	0.00127477

Tabla 5.4. Valor Z óptimo de acuerdo con meta de scrap.

Una vez definido el valor Z objetivo, y utilizando los modelos predictivos para la altura promedio y desviación estándar promedio descritos en el capítulo 5.1.1 y 5.1.2. se encontró que a las 36299 piezas producidas (en el modelo teórico) se obtiene un valor Z de -3.71, es decir, a partir de este punto la cantidad de piezas fuera de especificación excede la meta de scrap. Tomando en cuenta el factor de conversión de 4.69 paneles producidos “en el mundo real” equivalentes a cada pieza producida en el modelo teórico, obtenemos un total de 170242 paneles producidos, equivalentes a 48 semanas en producción.

Theoretical Produced panels (K)	Predicted AVG Height	Predicted STD DEV	Puntuación Z	Real life produced panels (K)	Equivalent in weeks (3521 panels per week)
36.299	0.161385954	0.009267905	-3.710218632	170.242	48

Tabla 5.5. Obtención de punto de quiebre para altura de impresión de pasta.

Es importante notar que el punto de reorden recomendado para la compra del nuevo herramental es en la semana 45 considerando:

- El tiempo de fabricación de un estencil nuevo es de 1 semana.
- El tiempo de validación de un nuevo estencil es de 2 semanas.

6.- Discusión final

El uso del análisis de regresión como una herramienta para la generación de un modelo matemático que permite inferir el comportamiento de un estencil demostró ser efectivo, ya que las predicciones realizadas por el modelo pueden ser corroboradas en la operación del herramental, al mismo tiempo que establecen un precedente para el monitoreo sistemático de este tipo de herramientas dentro del sistema de gestión de calidad y de operaciones de Continental La Tijera. De igual manera, la implementación de esta metodología abre la discusión sobre la viabilidad de este tipo de análisis en otros herramentales, dejando de limitarla a herramentales de soldadura y extendiéndola a todo tipo de herramentales que presenten desgaste mecánico durante la operación, como pueden ser dados de preforma y herramientas de corte y/o despenalizado de PCBs.

Sin embargo, es importante notar que el uso del análisis de regresión presenta algunas limitantes, principalmente relacionadas con la exactitud del modelo, cuyo coeficiente de determinación si bien fue aceptable de manera empírica, no explica todos los cambios de la variable dependiente (altura de impresión de pasta). Se hipotetiza que existen varios factores externos que no pueden ser controlados, como pueden ser variación entre lotes de la viscosidad de la pasta de soldadura, así como variaciones en la humedad y temperatura ambiental, los cuales probablemente expliquen el bajo coeficiente de determinación.

Otra de las limitantes a considerar es el tiempo que toma la organización y limpieza de los datos de altura de impresión de pasta (referido a partir de este momento como *raw data*), ya que en promedio se consume una jornada de trabajo (9 horas) por mes de *raw data* a analizar. Esto hace que el uso de esta herramienta, utilizando el proceso implementado en esta investigación, solamente sea práctico para herramentales

definidos como críticos, sea por tener un historial de problemas de calidad con el cliente o por presentar tasas altas de scrap en la operación del día a día.

6.1.- Consecuencias de la aplicación de la estrategia

La implementación del modelo de regresión para el cálculo de un punto de reorden en los estónciles del producto Mando MGH100, en conjunto con el enfoque sistémico del manual de gestión de la calidad, el cual se centra en la difusión del conocimiento específico de este producto, así como de las buenas prácticas y lecciones aprendidas desarrolladas previo y durante el transcurso de esta investigación, permitieron una reducción drástica de los rechazos relacionados con fallas de soldadura, así como del scrap interno relacionado con este modo de falla. Es importante mencionar que el contenido completo del manual de calidad no puede ser compartido en esta tesis, debido a que es propiedad intelectual de Continental, por lo que se presentarán extractos del mismo. Referirse a la imagen 6.1 para un ejemplo del archivo de lecciones aprendidas para la plataforma MGH100, así como a la imagen 6.2 para el entrenamiento de producto impartido a los colaboradores de Continental involucrados con el cliente Mando.

De igual manera, el enfoque en lecciones aprendidas fue utilizado en la introducción de las plataformas MODI y MOCI de la familia MGH100, así como para la plataforma MAS65, la cual, si bien es para el mismo cliente, tiene un diseño y aplicación distinto, enfocado a las columnas de dirección. El uso específico de las lecciones aprendidas fue en el apartado de la impresión e inspección de pasta de soldadura, donde el monitoreo de altura de pasta fue implementado de manera nativa, anticipándose a un potencial reclamo de cliente. Referirse a las imágenes 5.4, 5.5 Y 5.6 como evidencia de esta implementación.

Debido a la metodología de monitoreo de scrap y fallas utilizado en Continental, resulta más práctico visualizar por separado los incidentes con cliente y los incidentes internos, por lo que la efectividad de las acciones se mostrará de esta manera.

#	Category	Problem	Lesson Learned / Action	Status
1	Process/Detection	Only volume is considered in SPI, height is assumed between volume vs stencil thickness	For components with thermal pad area, height should be consider as well for SPI detection	Closed
2	Quality/Release	For line release, only cross section from the pins from ASIC & MCU component were performed	For components with thermal pad area, double cross section should be performed. 1. Pin area 2. Thermal pad area	Closed
3	BGA Solder crack	BGA Issue - Solder crack (Detected in Customer line)	Stencil BGA diameter change (0.4mm @ 0.45mm)	Closed
4	Customer claim	DTC-C17024A - Variant Coding not Match on NV4a (MOC) project *Due to a malfunction on FOCUS CAN2 simulator, there was intermittent. This caused the variant coding not to be written within the ECU's expected conditions, leading to test DTC classifying. *The defined test conditions on FTS to perform the DTC check, did not allow to detect the DTC	Action for occurrence: Rewiring of Focus Simulator CAN2 line: Focus simulator CAN2 line will be rewired in order to ensure that CAN2 communication is stable. Action for detection: Continental does not have a way to set up the FTS to detect DTC17024A in an effective way. Continental kindly asks Mando's support in order to develop this test.	Closed
5	Customer claim	Excessive BURRs on MOC1 ECUs. Failure was caused by a misalignment between the upper and lower tooling (misalignment can happen on X & Y axis). When both sides of the friction welding tooling are not perfectly aligned, Burr is generated.	Action for occurrence: Installation of auto centering bolts on the friction welding equipment, eliminating the need to perform manual alignment. Action for detection: Update safe launch work instruction, adding an inspection sequence and limit sample criteria. Action for detection: Update friction welding SWI, adding an inspection sequence and limit sample criteria. Systemic action: For future purchases of friction welding toolings, centering bolts will be requested as a must have feature.	Closed
6	Customer claim	MCB reported a module with damage/missing bushing in a MOC1 housing	Corrective actions: Hot functional test's guiding pins were changed from square tip to conical tips, allowing part to center without mechanical damage. Hot functional test's spare part list was updated to ensure the continuous use of this pin configuration.	Closed
7	Customer claim	Loss of containment: Segregated ECUs from the DTC-C17024A shipped to customer	Action for occurrence: Quality concept was updated, adding a diagnostics flow that makes mandatory to return to HFT units that are sent to the diagnostics area	Closed

Imagen 6.1. Archivo de lecciones aprendidas para familia MGH100

The diagram illustrates the electronic control system of a vehicle, showing the integration of various sensors and actuators. The central components are the HCU (Hydraulic Control Unit) and ECU (Electronic Control Unit), which are interconnected with the ENG (Engine) and EMS (Engine Management System). The system includes several sensors: Front Speed Sensor, Rear Speed Sensor, Steering Angle Sensor, Yaw & Lateral G Sensor, Pressure Sensor, and Wheel Speed Sensor. These sensors provide data to the HCU and ECU, which then control the actuators: Front Speed Sensor, Rear Speed Sensor, Steering Angle Sensor, Yaw & Lateral G Sensor, Pressure Sensor, and Wheel Speed Sensor. The diagram also shows the Master Cylinder and Pressure Sensor, which are part of the hydraulic system. The HCU and ECU are connected to the EMS, which in turn controls the ENG. The diagram is color-coded, with red lines indicating the control signals and blue lines indicating the data signals.

93

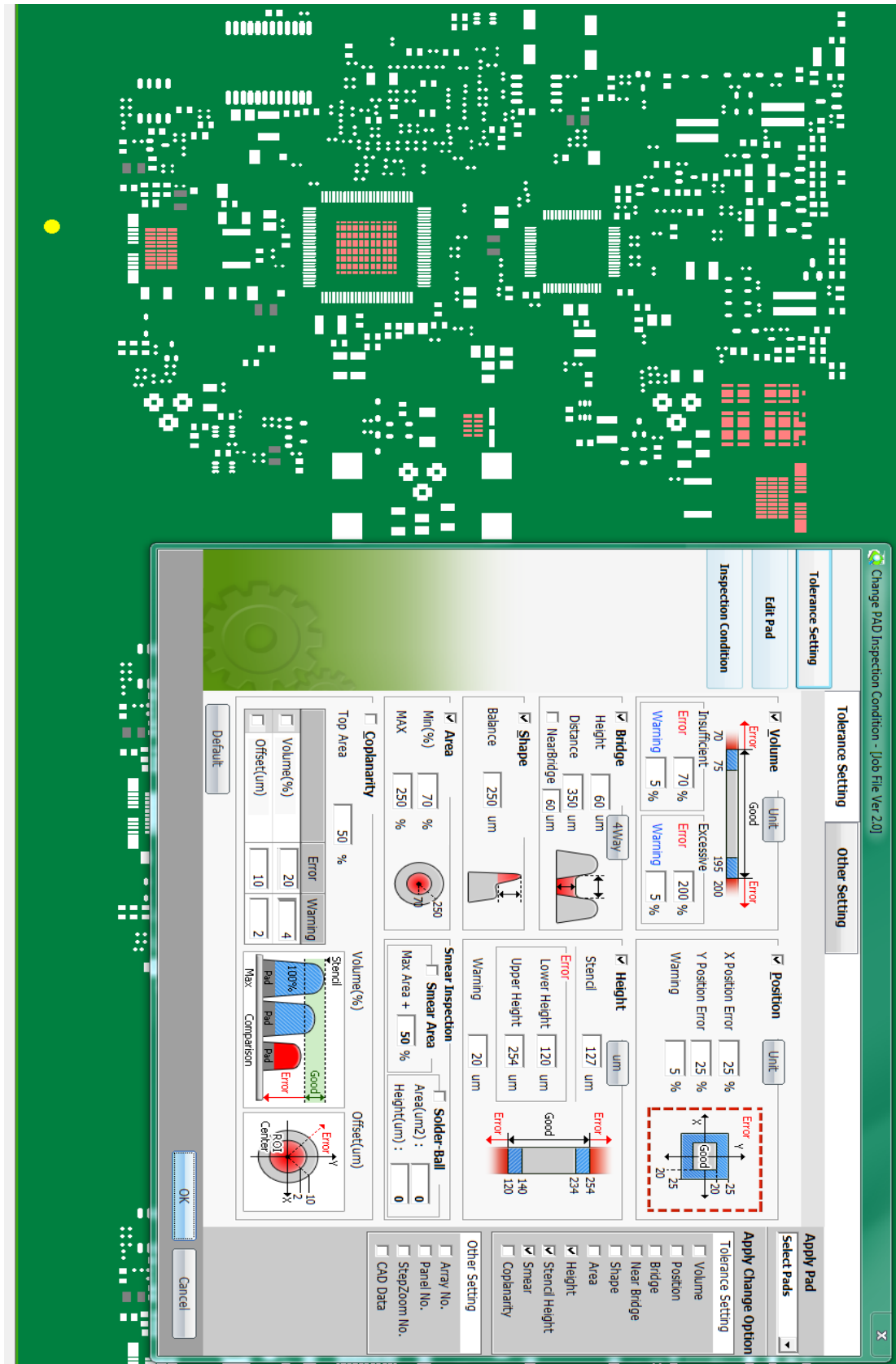


Imagen 6.4. Implementación de inspección de altura de pasta en plataforma MOCi

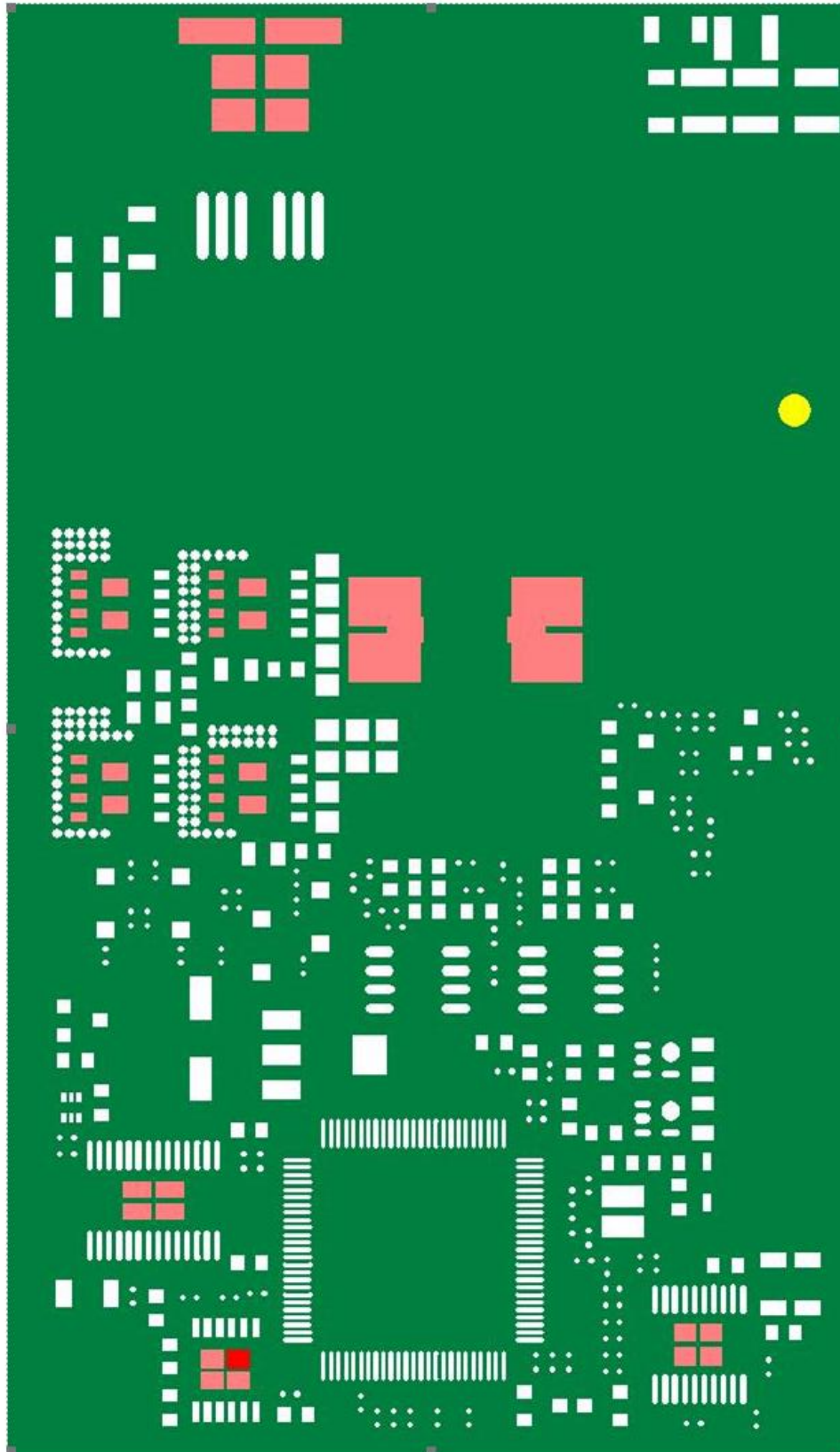


Imagen 6.5. Implementación de inspección de altura de pasta en plataforma MAS65

6.1.1- Eliminación de los incidentes de cliente relacionados con soldadura defectuosa.

Para comprobar la efectividad de las herramientas desarrolladas durante esta investigación en la eliminación de incidentes de cliente, se tomó como punto inicial la fecha de implementación de la medición de altura de impresión de pasta en la estación de *Solder Paste Inspection*, la cual fue hecha el 13 de julio de 2022 y como punto final el mes de septiembre 2022. Se realizó un barrido de CQTS (*Continental Quality Tracking System*), el cual es una base de datos en la que se almacena, a nivel global, la incidencia de reclamos de cliente, así como las acciones tomadas para la resolución de estos problemas.

Los filtros utilizados fueron los siguientes:

- Localidad de manufactura: Continental La Tijera.
- Rango de fechas de manufactura de las unidades reportadas: 13 de julio 2020 a 30 de septiembre 2022.
- Modos de falla: Todos los modos de falla reportados por cliente.
- Lugar en el que ocurrió la falla: Todas las fallas de campo y 0km registradas en los mercados mexicano, brasileño y estadounidense fueron consideradas (Nota: los vehículos para los que las variantes de la plataforma MGH100 producida en Guadalajara no están destinados para venta fuera del continente americano).

Como puede verse en la imagen 6.6. y 6.7. desde la fecha de implementación de la medición de altura de pasta en *Solder Paste Inspection*, ninguna falla ha sido reportada por los clientes de Continental La Tijera, por lo que es posible considerar que la causa raíz de este modo de falla fueron atacadas correctamente, a través del establecimiento de controles para la detección temprana de depósitos de pasta de soldadura con altura inadecuada, así como en el entrenamiento de los miembros del equipo de manera que las lecciones aprendidas durante las fases tempranas de

producción en serie del MGH100 sean mantenidas en este proyecto, así como aplicadas en proyectos subsecuentes.

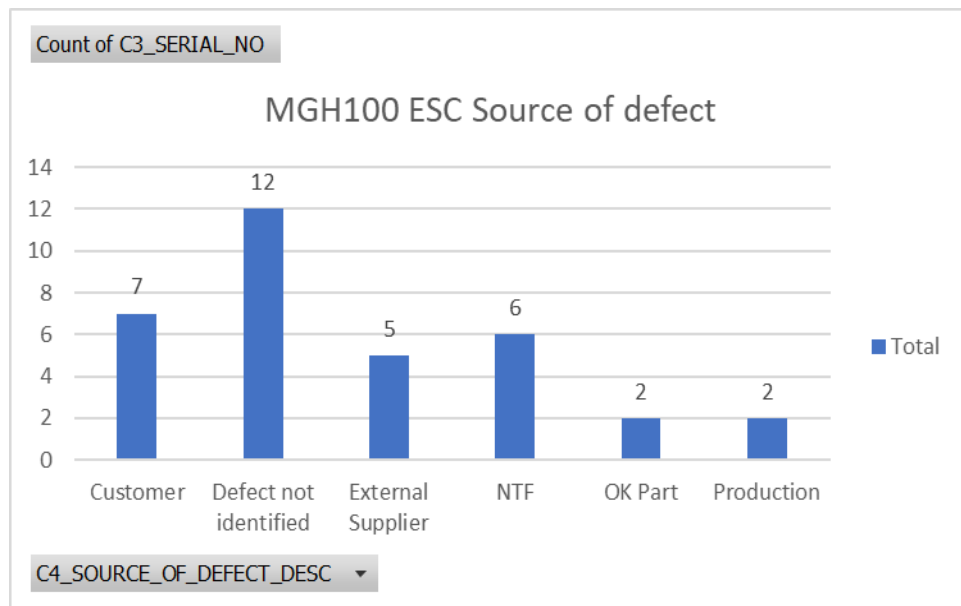


Imagen 6.6. Distribución de fallas de cliente para MGH100 ESC

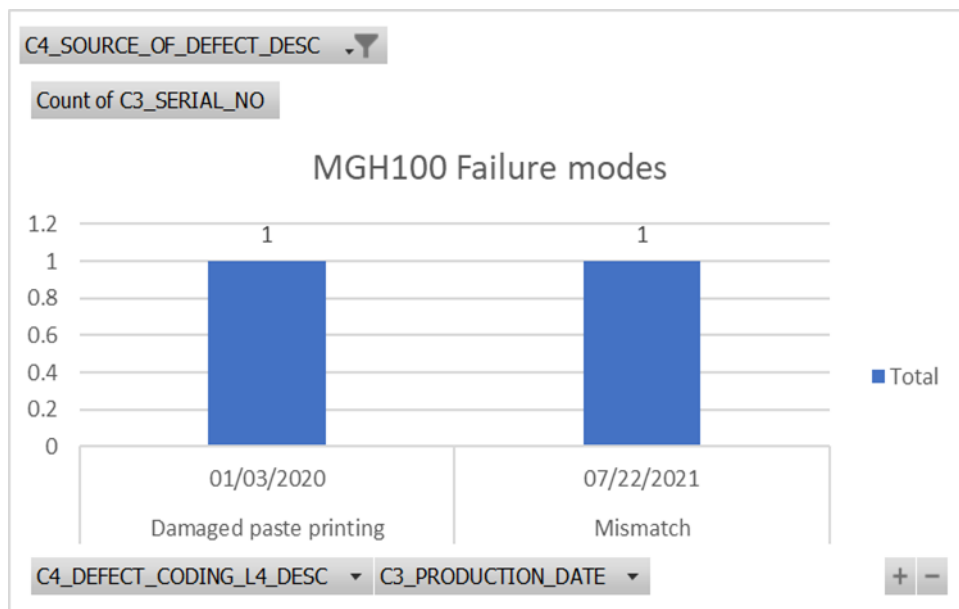


Imagen 6.7. Descripción de las fallas de producción en MGH100 ESC

6.1.2- Reducción de scrap relacionado con fallas de soldadura.

Para comprobar la efectividad de las herramientas desarrolladas durante esta investigación en la reducción de scrap relacionado con fallas de soldadura se realizó un barrido de la base de scrap de Continental La Tijera, donde se captura la fecha de falla, así como el modo de falla de cada una de las unidades rechazadas durante un proceso de manufactura y/o inspección. Los filtros utilizados para este barrido fueron los siguientes:

- Localidad de Manufactura: Continental La Tijera.
- Rango de fechas: 13 de julio 2020 a 30 de septiembre 2022.
- Componente pertinente: ASIC- El cual es el componente relevante para esta investigación.
- Lugar de Falla: Cualquier falla relacionada con el componente ASIC o en estaciones de prueba eléctrica y/o funcional.

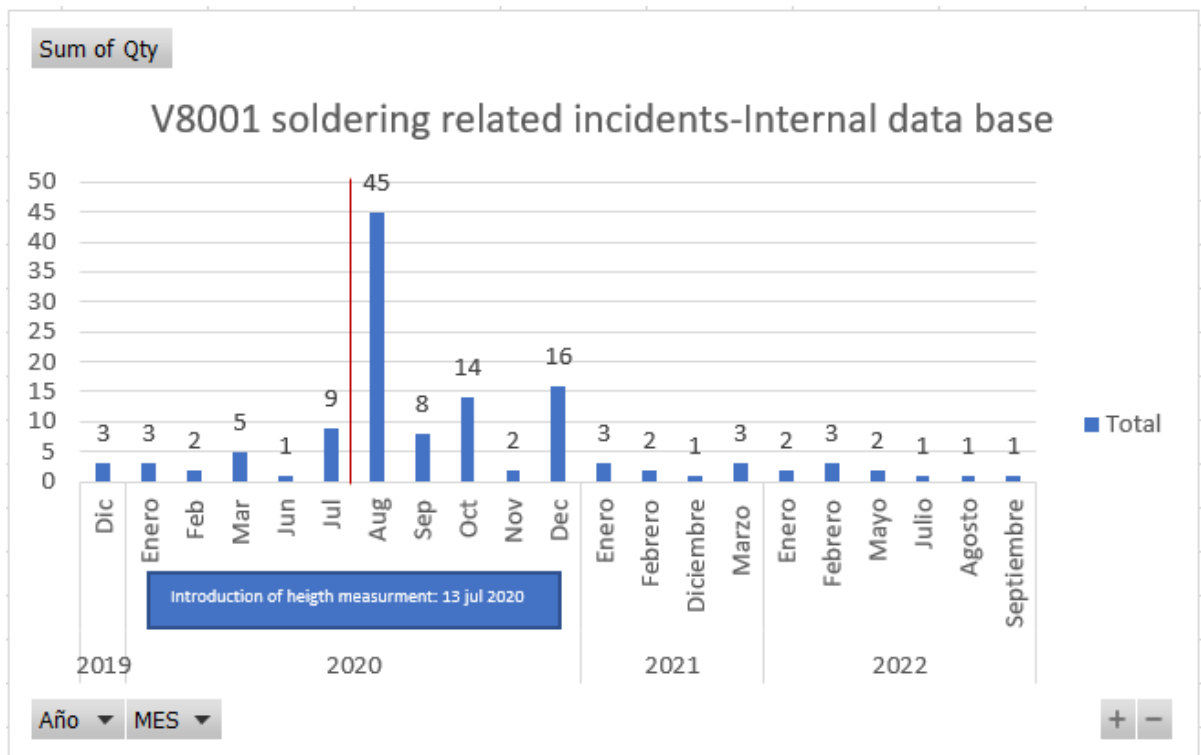


Imagen 6.8. Tendencia de scrap relacionado a V8001

Como puede observarse en la imagen 6.8, posterior al inicio del monitoreo de altura de pasta, hubo un incremento en los incidentes relacionados con el componente V8001. Esto se explica debido a la detección adicional implementada. Esta situación fue atacada a través de mejoras en los parámetros de impresión de pasta.

Es importante considerar que el impacto económico directo de esta reducción en fallas no implica ahorros sustanciales desde la perspectiva de una reducción en scrap, ya que cada pieza tiene un costo de MXN 242.19. Sin embargo, al considerar que cada una de las piezas detectadas hubiera presentado una falla en el OEM (*Original Equipment Manufacturer*), el cual hubiera implicado el sorteo de todo el material producido en el mes en cuestión. El ahorro por cuestión de sorteos evitados puede verse en la tabla 6.1. En esta tabla se considera un costo por pieza sorteada de 1.17 USD y una producción promedio mensual de 31,689 piezas. El costo total de sorteos evitados es de 556,142 USD, lo que equivale a 10,566,698 MXN, tomando una tasa de cambio de 19 pesos mexicanos por dólar.

Year	Month	Average production	Cost per unit (USD)	Potential sorting Cost
2020	Aug	31689	1.17	37076
2020	Sep	31689	1.17	37076
2020	Oct	31689	1.17	37076
2020	Nov	31689	1.17	37076
2020	Dec	31689	1.17	37076
2021	Jan	31689	1.17	37076
2021	Feb	31689	1.17	37076
2021	Mar	31689	1.17	37076
2021	Dec	31689	1.17	37076
2022	Jan	31689	1.17	37076
2022	Feb	31689	1.17	37076
2022	May	31689	1.17	37076
2022	Jul	31689	1.17	37076
2022	Aug	31689	1.17	37076
2022	Sep	31689	1.17	37076
Total Sorting cost				556142

Tabla 6.1 Sorteos potenciales evitados

6.2.-Aspectos de la mejora para intervenciones subsecuentes

En la opinión del autor, las mejoras deben enfocarse en los siguientes puntos:

- Hacer que el tratamiento del *raw data* sea más sencillo, lo cual pudiera lograrse ya sea creando un modo de exportación de datos en el equipo de *Solder Paste Inspection* que permita exportar solamente la información relevante para la realización del análisis de regresión, es decir, el componente pertinente para el análisis, o en su defecto, creando herramientas de IT (*information technologies*) que permitan acelerar el tratamiento de los datos, ya sea a través de macros de Excel que filtren automáticamente los datos, o mediante RPA (*Robotic Process Automation*), permitiendo simular las actividades hechas por el investigador,

con lo que se podría dejar el RPA corriendo mientras que el investigador no está utilizando la computadora.

- Con el fin de asegurar que el análisis de regresión de los datos de *Solder Paste Inspection* se realice de manera adecuada, es necesario que futuros analistas tengan conocimientos de estadística avanzada. Por lo tanto, de querer implementarse el análisis de desgaste de herramientas como parte del sistema de gestión de la calidad de una empresa, el autor considera importante desarrollar un procedimiento que permita definir cuales estenciles tienen relevancia suficiente como para ser considerados para este estudio. Se recomienda considerar factores tales como:
 - Incidencia de reclamos de calidad por parte del cliente, sea interno o externo.
 - Altos niveles de scrap.
 - Evidencia de debilidades en el diseño del estencil que pudieran llevar a un desgaste acelerado.
 - Evidencia empírica de fallas de soldadura en componentes similares utilizados en productos existentes.

La implementación de estas medidas permitirá que la investigación subsiguiente sea mucho más rápida y amigable con el usuario, lo cual a su vez permitiría extender el análisis a más de una referencia (componente). De igual manera, el desarrollo de procedimientos y entrenamientos asegurarían la viabilidad económica de este tipo de análisis en un contexto empresarial.

En la actualidad, los resultados de esta investigación están siendo evaluados por Continental para su implementación como un método de control para estenciles considerados críticos, ya sea por su complejidad técnica los haga propensos a fallas o porque de manera empírica se sabe que presentan fallas en una referencia dada debido a desgaste. La implementación efectiva de la metodología descrita en este

trabajo permitirá a Continental llevar un control preventivo de los estónciles críticos, lo cual potencialmente podría verse reflejado como una reducción significativa de reclamos de calidad tanto de Okm como de campo, así como una reducción sensible en el scrap generado por estónciles desgastados.

7.- Glosario

- Análisis de regresión: Técnica estadística utilizada para estimar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes.
- ASIC: Acrónimo de *Application Specific Integrated Circuit* o Circuito Integrado de Aplicación Específica, se refiere a un chip diseñado para un uso específico, en vez de un chip diseñado para un uso general.
- Build to print: la manufactura de equipos, componentes o productos de acuerdo con especificaciones exactas definidas por un cliente. Por lo general estas especificaciones se entregan como diseños generados por un representante del cliente.
- Chips Scale Package (CSP): Componentes que combinan una alta capacidad de procesamiento, en un paquete de dimensiones reducidas. Los componentes CSP tienen la particularidad de tener una distancia entre pines (pitch) de 0.015
- Comunicación CAN: Acrónimo de *Controller Area Network* la comunicación CAN hace referencia a una red de comunicación que permite que distintos microcontroladores se comuniquen entre ellos dentro de una computadora.
- PCB: *Printed Circuit Board*. Una tarjeta de circuito impreso es un circuito cuyos componentes están contenidos dentro de una estructura mecánica", generalmente hecha de fibra de vidrio.
- Scrap: desperdicio, material inutilizable de una operación de manufactura, el cual será descartado.
- Squeegee: Hojas, generalmente de acero inoxidable, que se utilizan para empujar la pasta de soldadura a través del estencil en los procesos de manufactura SMT.
- Stencil: Plantilla utilizada para transferir pasta de soldadura a un PCB virgen.
- SMT: la técnica de manufactura electrónica en la que los componentes son ensamblados, utilizando máquinas automáticas, en la superficie del PCB

- QFP: Acrónimo de *Quad Flat Package*, hace referencia a un componente con un empaquetado cuadrado o rectangular, con pines en forma de “ala de gaviota”, los cuales se extienden por los 4 lados.
- VIA Hole: Un VIA hole en un PCB corresponde a 2 pads que están ubicados en distintas capas del PCB, los cuales están conectados eléctricamente a través de un agujero cuyas paredes tienen un acabado electroplatinado.
- Pad (de PCB): Área del PCB la cual está designada para servir como una interfaz para el contacto eléctrico entre la tablilla y el componente.
- Ramp-up: Hace referencia al momento cuando una compañía aumenta de manera significativa la salida de un producto o servicio. De igual manera, se refiere al momento en el que un producto deja la fase de prototipo y empieza la producción regular.

8.-Bibliografía

- Bell Power solutions. (2016). Obtenido de <https://www.belfuse.com/resources/ApplicationNotes/PowerSolutions/app-note-BPS-Non-Isolated-DC-DC-Converter-Eutectic-Solder-Process.pdf>
- Continental Automotive AG. (2020). *Process specification Stencil printing with Solder paste-TST N 002 16 22*. N/A: Continental.
- Elitetechn. (6 de Junio de 2014). *Elitetechn*. Obtenido de <http://www.elitetechn.com/blog/build-to-print-vs-build-to-specification/>
- ESSO Electronic. (23 de Enero de 2022). *ESSO Electronic*. Obtenido de <https://www.eso-electronic.com/en/knowledge-base/manufacturing/how-does-smt-electronics-assembly-work/>
- Gopal, S., Rohani, J., Yusof, S., & Bakar, Z. (2006). Optimization of Solder Paste Printing Parameters Using Design of Experiments . *Jurnal Teknologi*, 11-20.
- Kumar, A., Baral, A., Rout, A., & Rout, B. (2012). Multi-objective optimization and predictive modeling of surface roughness and material removal rate in turning using grey relational & regresion analysis. *Procedia Engineering* 38, 1606-1627.
- Kumar, V., & Garg, M. (2018). Predictive Analytics: A Review of Trends and Techniques. *International Journal of Computer Applications*, 31-37.
- Kurtz Ers. (2021 de Febrero de 2021). *kurtzsa.com*. Obtenido de <https://www.kurtzsa.com/electronics-production-equipment/solderlexicon/begriff/squeegee-pressure.html#:~:text=Squeegee%20pressure%20is%20the%20force,smearing%20the%20paste%20and%20bridges.>
- Kurz Ers. (15 de Febrero de 2021). *kurtzsa.com*. Obtenido de <https://www.kurtzsa.com/electronics-production-equipment/solderlexicon/begriff/squeegee-speed.html>
- Kurz Ers. (15 de Febrero de 2021). *kurtzsa.com*. Obtenido de <https://www.kurtzsa.com/electronics-production-equipment/solderlexicon/begriff/separation-speed.html>
- Mendoza Patiño, C. O. (2019). *Reestructuración de los procesos operativos de una fábrica de suelas*. San Pedro Tlaquepaque: Repositorio institucional ITESO.
- Moko Technology. (10 de septiembre de 2021). *Moko Technology*. Obtenido de Moko Technology: <https://www.mokotechnology.com/es/smt-stencil/>
- NXP. (2019). *AN4388- Quad Flat Package (QFP)*. NXP.
- NXP semiconductors. (2019). *AN4388- Quad Flat Package*. NXP B.V.
- NXP Semiconductors. (2019). *AN4388- Quad Flat Package (QFP)*. NXP B.V. Obtenido de NXP Semiconductors.
- Pan, J., Tonkay, G., Storer, R., Sallade, R., & Leandri, D. (1999). Critical Variables of solder paste stencil printing for Micro-BGA and Fine Pitch QFP. *IEEE/ CPMT International Electronics Manufacturing Technologies Symposium*, 94-101.
- Paterson , Z. (5 de Octubre de 2020). *Altium*. Obtenido de Altium: <https://resources.altium.com/es/p/what-is-a-pcb>
- Perez, A. (10 de Mayo de 2018). *OBS Bussines School*. Obtenido de OBS Bussines School: <https://www.obsbusiness.school/blog/que-se-dedican-los-ingenieros-consultores>

Sanchez Turcios, R. (2015). t-Student. Usos y abusos. *Revista Mexicana de Cardiología*.

Santos, D., & Mohanty, R. (2007). *Process Development And Characterization Of the Stencil Printing Process for Small Apertures* . New York: Suny Binghamton- Speedline Technologies.

Smart Machine Technologies Inc. (04 de 04 de 2021). *Smart Machine Technologies Inc.*. Obtenido de <https://www.smartmachine.com/build-to-print-fabrication-vs-design-and-spec-fabrication/>

Snee, R. D. (1977). Validation of Regression Models: Methods and examples . *Technometrics* , 415-428.

Surface Mount Process . (10 de Septiembre de 2021). *Surface Mount Process* . Obtenido de Surface Mount Process : <https://www.surfacemountprocess.com/>

Texas Instruments. (2013). *Mounting of Surface Mount Components*. Dallas, Texas, USA: Texas Instruments.

UAL . (07 de febrero de 2021). *Biblioteca UAL* . Obtenido de Biblioteca UAL : http://ual.dyndns.org/biblioteca/metodologia_investigacion/pdf/unidad_02.pdf

Valdovinos Flores, G. (2017). *Mejora en el rendimiento de ICT proyecto Nissan*. San Pedro Tlaquepaque: Repositorio Institucional ITESO .