

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ÁREA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO DE CORTE POR  
TROQUELADO MEDIANTE LA METODOLOGÍA DMAIC-DoE**

Que se presenta para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**Alumno:**

Ing. Juan Alfredo Escobar Ante

**Directora de tesis:**

Dra. Karla Isabel Velázquez Victorica

**Diciembre de 2018**

## Introducción

En Baja California, la industria maquiladora está altamente desarrollada, siendo Mexicali pionero a nivel estatal y nacional con la manufactura de productos textiles. El desarrollo de la industria de transformación y la maquiladora, se ha dado principalmente en el ramo de alimentos, automotriz, aeroespacial, electrónica, metal mecánica, productos médicos, envases de vidrio, plástico y textil. Otras industrias importantes son la fabricación y ensamblaje de artículos eléctricos y electrónicos, tracto camiones, remolques de carga y maquiladoras de juguetes.

La industria es uno de los renglones más dinámicos de la economía de la región, Mexicali es reconocida como un importante centro de producción compartida. Existen importantes empresas como: Bimbo, Maseca, Vitro, Vyair Medical, Skyworks, Honeywell, Kenworth, Sabritas, Gulfstream, Wslock Co. Goldstar of America, Itt, Hikam of America, Kurón y Cooper Industries, por mencionar algunas, quienes han comprobado las ventajas de operar en la frontera ante los dinámicos mercados de E. U. y de la cuenca del pacífico. La ciudad de Mexicali, goza de un régimen fiscal preferencial para la importación de materias primas y determinados productos, lo que representa una ventaja respecto a otras ciudades del país. Mexicali cuenta con una comunidad empresarial con gran experiencia en negocios internacionales y dispuestos a co-invertir [1].

La industria eléctrica se ha desarrollado gracias a las características naturales, específicamente geológicas que posee la región. Mexicali cuenta con una planta geotermoeléctrica que es suficiente para abastecer a todo el estado y además exportar este energético.

En Baja California y en todo México, la industria de la electrónica es una de las más importantes, sin dejar de lado la industria aeroespacial, que ha venido creciendo de forma acelerada en la última década. En los últimos 40 años, Baja California se ha convertido en una de las regiones más importantes de Norte y Latinoamérica en el área de manufactura de productos electrónicos. La mayoría de plantas son fundadas con capital de reconocidos corporativos de Asia y los Estados Unidos.

Algunos de los electrónicos fabricados en Baja California son tarjetas de circuitos impresos, componentes y artículos de audio y video, dispositivos para computadoras, dispositivos de telecomunicaciones y comunicaciones, componentes electrónicos para las industrias médica, automotriz y aeroespacial, radares marinos de onda acústica, celulares, televisores, microchips y semiconductores, manufacturados por compañías de clase mundial, tales como Samsung, Sharp, Plantronics y Bose, entre otros [2].

***Este proyecto se realiza en la empresa extranjera Electrónica Vanguard***, la cual está ubicada en Mexicali Baja California, México, en el parque industrial Calafia 2, código postal 21600 en la colonia Mariano Abasolo. La producción en Electrónica Vanguard México se enfoca en la fabricación de componentes electrónicos. Electrónica Vanguard inicia sus operaciones en el año de 1970 y actualmente son la segunda empresa maquiladora con mayor antigüedad en el país [3].

Electrónica Vanguard ha sido un líder de la industria durante más de sesenta años en el diseño y fabricación de inductores y transformadores, es proveedor de distintos ramos industriales tales como militar, aeronáutica, espacial, medicina, además de las industrias de petróleo y gas [4].

La empresa inició operaciones desde 1952 y actualmente tienen su sede en Huntington Beach, California, en los Estados Unidos de América, ahí cuenta con dos plantas donde se lleva a cabo actividades de investigación y desarrollo, creación de prototipos y análisis de laboratorio. Vanguard tiene una planta de fabricación de 40,000 pies cuadrados adicionales ubicada en Mexicali, México. Las tres instalaciones cumplen con los más altos estándares de la industria aeroespacial y militar como:

- ITAR Compliant
- DLA Authorized
- MIL-PRF-27
- AS9100 REV C
- ISO 9001:2008
- MIL-STD-981

La empresa cuenta con una gama muy amplia de productos manufacturados entre los que se encuentran los siguientes:

- Power Magnetics (MIL-PRF-27)
- RF y Microwave (MIL-PRF-15305)
- Pulse and data bus - MIL-STD-1553
- Custom products. [4]

En Mexicali, la empresa cuenta con una distribución de planta dividida en cinco principales áreas de producción, en la que se encuentra la que lleva el nombre de *chips*. Aquí se realiza la fabricación de los componentes más pequeños de todos los productos manufacturados en la planta de México, su elaboración es compleja, gran parte de esto se debe a sus pequeñas dimensiones. Los inductores nacen de las celdas de producción y son sometidos a diversos procesos como embobinado, encapsulado del componente electrónico mediante moldeo por transferencia de calor y micro troquelado, por mencionar algunos. De este último proceso surgen diferentes defectos en el producto, lo que conlleva a realizarle una reparación llamada parche, en este re trabajo o reparación, están involucrados por lo menos dos operadores extras por celdas, donde en cada celda cuenta con siete operadores en promedio, sin contar con los que adhieren por dicho re trabajo.

## **Hipótesis**

Mediante la aplicación de la metodología propuesta DMAIC-DoE, se mejorarán los niveles de calidad del proceso de corte por troquelado de componentes electrónicos en términos de reducción de defectos.

## **Objetivo general**

Optimizar el proceso de corte por troquel de componentes electrónicos en términos de calidad, mediante la aplicación de la metodología DMAIC-DoE.

## **Objetivos específicos**

- I. Aplicar la Metodología propuesta DMAIC-DoE
- II. Desarrollar el diseño de experimento en el proceso de troquelado
- III. Analizar estadísticamente los datos
- IV. Validar el experimento

## Metas

1. Evaluación diagnóstica del proceso de troquelado
2. Medición de métricos de calidad (variable de respuesta)
3. Análisis del proceso de troquelado
4. Identificación de factores potenciales para troquelado
5. Identificación de límites y especificaciones para factores potenciales del proceso de troquelado
6. Selección de variables de respuesta
7. Selección del diseño de experimentos
8. Matriz de diseño experimental
9. Pruebas experimentales bajo condiciones controladas
10. Análisis de varianza (ANOVA)
11. Selección de niveles óptimos para los factores potenciales del proceso de troquelado.

## Justificación del proyecto

La compañía Electrónica Vanguard Mexicali cuenta con áreas de oportunidad identificadas en el plano de calidad de sus productos de circuitos integrados. Estas oportunidades consisten en la reparación del componente hasta en un 100% de la producción, a esta reparación se le conoce como parche. Con esta investigación se busca dar solución a una problemática real que presenta la empresa en sus procesos de corte por troquelado de componentes electrónicos, el cual tendrá un impacto positivo en sus niveles de calidad en términos de defectos del producto. Al definir un método de operación, se podría emplear en otras familias de componentes electrónicos, ya que la gama de componentes es amplia.

El proceso actual de troquelado se realiza en una prensa que cuenta con un pistón neumático, un troquel de corte que está diseñado con una base, una tapa, dos postes con sus respectivas tasas, matriz, ponche, tope y botador. La matriz y el ponche cuentan con insertos de material de carburo de tungsteno, que sirven para hacer la función de cortar, debido a que este material tiene características de propiedades mecánicas de un alto nivel de dureza, resistente al desgaste, ideal para la fabricación de herramientas [5].

En la operación de corte por troquelado de los componentes electrónicos, se coloca una lamina (lead frame) con espesor de cinco milésimas de pulgada en la matriz, esta lleva incrustada diez piezas (chip inductor). Una vez colocadas, el operador acciona una válvula de mando que activa un pistón, este hace bajar la tapa del troquel que lleva ensamblado el ponche, con esto las piezas son empujadas hacia el botador. Al hacer contacto matriz y ponche se realiza el corte o separación de las piezas. Aquí surgen por motivos aun no conocidos diferentes defectos, principalmente fracturas del componente, lo que conlleva a su posterior reparación. No existe un método establecido para la operación, ni parámetros ni análisis estadístico, lo que deja un área de oportunidad para resolver la problemática de reparación de parche, que incide hasta en un 100% de la producción.

La falta de control en los parámetros del proceso, tales como la velocidad de corte, la geometría de la herramienta, el afilado de la misma, los materiales empleados en elementos claves como el botador, entre otras posibilidades, están provocando problemas en el rendimiento de la calidad del proceso, lo que conlleva a variación dimensional y quebraduras. Estas causas motivan la realización de este proyecto de investigación.

Metodologías de mejora como DMAIC por sus siglas en inglés Define, Measure, Analyze, Control, Improve que en español significa Definir, Medir, Analizar, Control y Mejorar, así como el diseño de experimentos se han utilizado en los últimos 30 años en el sector industrial para resolver problemas de calidad, control y estandarización de procesos, logrando resultados satisfactorios, adoptándose como un estándar a nivel internacional, por lograr satisfacer las necesidades de los clientes con niveles próximos a la perfección. Investigadores de prácticamente todos los campos de estudio llevan a cabo experimentos, por lo general para descubrir algo acerca de un proceso o sistema particular [6].

La integración de ambas metodologías es una de las aportaciones que tiene el presente trabajo, ya que existe literatura que hace evidente la falta de experimentación en algunas áreas.

En el actual trabajo de investigación se presenta la metodología propuesta DMAIC-DoE, la cual ha ya ha sido utilizada en dos ramos de la industria, una del ramo aeroespacial, donde fue introducida por primera vez y en otra ocasión en una empresa de servicios de transportación, teniendo resultados satisfactorios en ambos casos. IX

## **Planteamiento del problema**

Se desconocen los factores críticos y niveles adecuados para la operación de corte por troquel de componentes electrónicos, lo que provoca problemas de calidad y costos.

Por lo anterior se establecen las siguientes preguntas:

¿Qué factores afectan directa o indirectamente la variable de respuesta del proceso del troquel en componentes electrónicos?

¿Qué niveles son los óptimos para optimizar los procesos de troquelado en componentes electrónicos?

¿En qué porcentaje se logran reducir los defectos del proceso de troquel de componentes electrónicos a través de la metodología propuesta DMAIC-DoE?

## **Alcance del proyecto**

Este proyecto se realizará en la empresa Electrónica Vanguard Mexicali, en sus procesos de corte por troquelado de los componentes electrónicos de la serie 34000. Número de parte identificado internamente.

## Tabla de contenido

|   |     |
|---|-----|
| Introducción.....   | II  |
| Hipótesis .....   | IV  |
| Objetivo general .....  | IV  |
| Objetivos específicos .....   | IV  |
| Metas .....   | V   |
| Justificación del proyecto .....  | V   |
| Planteamiento del problema.....   | VII |
| Alcance del proyecto .....  | VII |
| Capítulo 1 Estado del arte.....   | 1   |
| 1.1 Antecedentes.....   | 1   |
| 1.1.2 Técnicas de optimización de procesos en la manufactura .....                        | 5   |
| 1.1.3 Reducción de pérdidas de los procesos de troquelado .....                           | 7   |
| 1.2 Principales aportaciones de los procesos de láminas metálicas .....                   | 8   |
| 1.2.1 Optimización de procesos de troquelado fino utilizando diseño de experimentos ..... | 9   |
| 1.2.2 Troquelado aplicado a componentes electrónicos.....                                 | 11  |
| 1.2.3 Aportaciones en los procesos de micro-troquelado .....                              | 12  |
| 1.2.4 La tendencia a la miniaturización en el campo de la electrónica .....               | 14  |
| 1.3 Aplicación del diseño de experimentos en procesos de troquelado .....                 | 15  |
| 1.3.1 Contribuciones importantes en la aplicación del diseño de experimentos .....        | 18  |
| Capítulo 2 Marco conceptual .....   | 19  |
| 2.1 Manufactura en la industria electrónica en México .....                               | 19  |
| 2.1.1 Industria electrónica en Baja California .....                                      | 20  |
| 2.2 Troquelado de metales .....   | 20  |
| 2.2.1 Troquelado convencional.....  | 21  |
| 2.2.2 Características y aplicaciones del troquelado de metales .....                      | 22  |
| 2.3 Dados .....   | 22  |
| 2.3.1 Componentes de un dado de corte.....  | 22  |

|   |    |
|---|----|
| 2.3.2 Tipos de datos .....  | 24 |
| 2.4 Prensas .....   | 27 |
| 2.5 Mantenimiento de troqueles .....  | 29 |
| 2.6 Principales problemas de calidad en el troquelado.....                        | 31 |
| 2.7 Herramientas para la mejora continúa.....                                     | 31 |
| 2.7.1 Ventajas de seis sigma sobre otras iniciativas de mejora continúa .....     | 32 |
| 2.7.2 Aplicación seis sigma .....   | 33 |
| 2.7.3 Metodología DMAIC .....   | 35 |
| 2.7.4 DoE alineado al modelo de mejora DMAIC .....                                | 37 |
| 2.7.5 Diseño de experimentos – DoE .....  | 38 |
| 2.7.6 DoE y su papel dentro de SEIS SIGMA.....                                    | 40 |
| 2.8 Equipos de medición para análisis de la calidad del corte por troquelado..... | 41 |
| 2.8.1 Inspección visual .....   | 42 |
| 2.8.2 Equipo de medición .....  | 42 |
| 2.9 Normatividad aplicable a la fabricación de componentes electrónicos .....     | 44 |
| Capítulo 3 Desarrollo de la Metodología.....                                      | 46 |
| 3.1 Fases del desarrollo de la metodología propuesta .....                        | 46 |
| 3.2 Generalidades del proceso de inductores .....                                 | 47 |
| 3.3 Características y requerimientos del producto.....                            | 48 |
| 3.3.1 Revisión del proceso de manufactura de inductores de la serie 34000.....    | 49 |
| 3.4 Planeación del proceso del trabajo metodológico.....                          | 51 |
| 3.5 Fase de Medición .....  | 56 |
| 3.5.1 Conocimiento sobre el estado actual de fabricación de inductores .....      | 56 |
| 3.5.2 Selección de la variable de respuesta .....                                 | 58 |
| 3.5.3 Validación del sistema de medición.....                                     | 58 |
| 3.5.4 Medición del proceso de troquelado .....                                    | 62 |
| 3.6 Características del Estudio Preliminar .....                                  | 67 |
| 3.6.1 Variables potenciales del proceso de troquelado .....                       | 72 |
| 3.7 Desarrollo de la fase Experimentar.....                                       | 73 |
| 3.7.1 Controles y plan de experimentación para variables potenciales .....        | 75 |
| 3.8 Fase de Análisis de los resultados .....                                      | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.9 Fase de Mejora del proceso de troquelado de componentes electrónicos ..... | 84  |
| 3.10 Fase de Control de proceso de corte de componentes electrónicos .....     | 92  |
| 3.10.1 Validación de la experimentación .....                                  | 92  |
| 3.10.2 Instrucciones de trabajo.....   | 97  |
| 3.10.3 Estandarización del nuevo método de trabajo.....                        | 101 |
| Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.....                            | 106 |
| Referencias .....  | 109 |
| Anexos .....   | 114 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| TABLA 2- 1 DESCRIPCION DE LA INDUSTRIA ELECTRONICA POR SUBSECTOR.....  | 19 |
| TABLA 3- 1 CARACTERÍSTICAS DEL INDUCTOR DE LA SERIE 34000.....   | 48 |
| TABLA 3- 2 RESUMEN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA .....   | 52 |
| TABLA 3- 3 DEFECTOS RELEVANTES EN EL PRODUCTO DE INDUCTORES.....   | 56 |
| TABLA 3- 4 DATOS PARA EL ESTUDIO DE MEDICIÓN .....   | 59 |
| TABLA 3- 5 DATOS DEL PROCESO DE CORTE .....  | 62 |
| TABLA 3- 6 ENTRADAS Y SALIDAS DEL PROCESO DE CORTE .....   | 68 |
| TABLA 3- 7 6M'S DE TROQUELADO.....   | 69 |
| TABLA 3- 8 FACTORES POTENCIALES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL INDUCTOR.....   | 70 |
| TABLA 3- 9 VARIABLES POTENCIALES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL INDUCTOR CON SUS<br>RESPECTIVOS NIVELES DE ESPECIFICACIÓN SUPERIOR E INFERIOR..... | 71 |
| TABLA 3- 10 FACTORES DE RUIDO PARA EL PROCESO DEL INDUCTOR. ....   | 71 |
| TABLA 3- 11 DISEÑO EXPERIMENTAL SELECCIONADO (A) .....   | 77 |
| TABLA 3- 12 RESULTADOS DE LAS INSPECCIONES DE LOS INDUCTORES.....  | 78 |
| TABLA 3- 13 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL (A) .....   | 78 |
| TABLA 3- 14 DISEÑO EXPERIMENTAL (B) DERIVADO DE LOS RESULTADOS DEL PRIMERO.....  | 85 |
| TABLA 3- 15 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL (B) .....   | 85 |
| TABLA 3- 16 VALIDACIÓN DEL PROCESO DE TROQUELADO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS   | 93 |
| TABLA 3- 17 INTERPRETACIÓN DE VALORES $C_p$ .....  | 95 |
| TABLA 3- 18 ANÁLISIS DEL ANTES Y DESPUÉS DE LA OPTIMIZACIÓN. ....  | 96 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 2. 1 PARTES BÁSICAS DE UN TROQUEL. FUENTE [33] ..... | 24 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2. 2 TROQUEL PROGRESIVO DE 10 ETAPAS PARA ALTA PRODUCCIÓN. NÓTESE QUE LAS GUÍAS YA NO EMPLEAN BUJES SINO SISTEMAS ANTIFRICCIÓN. FUENTE [35] ..... | 26 |
| FIGURA 2. 3 DEFINICIÓN DE LAS PIEZAS DEL TROQUEL CON PUNZÓN FIJO. FUENTE [34] .....  | 26 |
| FIGURA 2. 4 PROCESO DE TROQUELADO POR CORTE FINO. FUENTE [34] .....  | 27 |
| FIGURA 2. 5 COMPONENTES DE UNA PRESNA CON TRANSMISIÓN MECÁNICA. FUENTE [36].....   | 28 |
| FIGURA 2. 6 PRESNA DE ESTRUCTURA EN “C” DE 50 TONELADAS. FUENTE [36].....  | 29 |
| FIGURA 2. 7 METODOLOGÍA DMAIC. FUENTE [42] .....   | 35 |
| FIGURA 2. 8 DMAIC SIGUE EL PROCESO UNIVERSAL DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS. FUENTE [42] .....   | 37 |
|  |    |
| FIGURA 3. 1 METODOLOGÍA PROPUESTA DMAIC DoE. FUENTE [51]. .....  | 47 |
| FIGURA 3. 2 DATOS TÉCNICOS PROPORCIONADO POR VANGUARD ELECTRONICS. [54] .....  | 49 |
| FIGURA 3. 3 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA MANUFACTURA DE INDUCTORES .....  | 51 |
| FIGURA 3. 4 PROCESOS PREVIOS Y POSTERIORES AL PROCESO DE TROQUELADO .....  | 57 |
| FIGURA 3. 5 COMPONENTE ELECTRÓNICO (INDUCTOR).....   | 58 |
| FIGURA 3. 6 TIPOS DE RESORTES. FUENTE[62]. .....   | 73 |
| FIGURA 3. 7 INSTRUMENTOS DE CONTROL .....  | 76 |

## Índice de Gráficas

|   |    |
|---|----|
| GRÀFICA 3. 1 PARETO DE DEFECTOS DEL PRODUCTO.....                             | 57 |
| GRÀFICA 3. 2 ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD.....                 | 61 |
| GRÀFICA 3. 3 HISTOGRAMA DE FRACTURA. ....                                     | 65 |
| GRÀFICA 3. 4 HISTOGRAMA DE FRACTURA. ....                                     | 66 |
| GRÀFICA 3. 5 DISPERSIÓN ENTRE LAS FRACTURAS .....                             | 67 |
| GRÀFICA 3. 6 DIAGRAMA DE CAUSA EFECTO PARA LA PROBLEMÁTICA DE TROQUELADO..... | 68 |
| GRÀFICA 3. 7 EFECTOS PRINCIPALES PARA LA RESPUESTA .....                      | 80 |
| GRÀFICA 3. 8 INTERACCIONES DE FACTORES PARA LA RESPUESTA.....                 | 81 |
| GRÀFICA 3. 9 NORMAL DE LOS EFECTOS SIGNIFICATIVOS.....                        | 82 |
| GRÀFICA 3. 10 DIAGRAMA DE PARETO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESPUESTA.....       | 83 |
| GRÀFICA 3. 11 EFECTOS PRINCIPALES SOBRE LA RESPUESTA.....                     | 87 |
| GRÀFICA 3. 12 INTERACCIONES DE FACTORES PARA LA RESPUESTA.....                | 88 |
| GRÀFICA 3. 13 NORMAL DE LOS EFECTOS SIGNIFICATIVOS.....                       | 89 |
| GRÀFICA 3. 14 PARETO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESPUESTA.....                   | 90 |
| GRÀFICA 3. 15 OPTIMIZADOR DE LA RESPUESTA.....                                | 91 |
| GRÀFICA 3. 16 CAPACIDAD DE PROCESO SIXPACK.....                               | 95 |
| GRÀFICA 3. 17 COMPARACIÓN DE PROCESOS .....                                   | 96 |

## Capítulo 1 Estado del arte

### 1.1 Antecedentes

Desde épocas muy arcaicas, el hombre ha modificado el aspecto y características de diversos materiales que se encuentran en su hábitat, a través del tiempo aprendió a dominar las técnicas o métodos mediante los que ha podido transformar esos materiales en elementos útiles para su subsistencia. Este fenómeno ha dado origen a los procesos de producción. En realidad, este concepto es muy amplio ya que incluye, por ejemplo, la producción de textiles, fármacos, metalmecánica, etc. De este modo, como proceso de manufactura se denomina a todo método de transformación de la materia mediante la aplicación de procesos físicos y químicos, de un determinado material [7].

La manufactura en su sentido más amplio, es el proceso de convertir la materia prima en productos, incluyendo el diseño del producto, la selección de la materia prima y la secuencia de procesos a través de los cuales será fabricado el producto, en otras palabras es más común el uso de la palabra fabricar para indicar la acción de producir objetos en serie, generalmente por medios mecánicos.

La palabra manufactura se deriva del latín *manus factus*, que significa hacer con las manos. Este concepto apareció por primera vez en 1567, y la palabra manufacturar en 1683. En el sentido moderno, la manufactura involucra la fabricación de productos a partir de materias primas mediante varios procesos, maquinarias y operaciones, a través de un plan bien organizado para cada actividad requerida [8].

A pesar de que es difícil ser más preciso, la manufactura existe desde hace aproximadamente 5000-4000 a.C. Es más antigua que la historia registrada, porque los símbolos primitivos y los dibujos en las cuevas o grabados en piedra, se hacían con algún tipo de pincel o de instrumento primitivo utilizando una "pintura" o algún medio de grabar la roca; para estas aplicaciones se tuvieron que hacer herramientas apropiadas. La manufactura de productos para diversos usos, se inició con la producción de artículos hechos de madera, cerámica, piedra y metal. Los materiales y procesos que se utilizaron primero para formar productos mediante la fundición y la forja, han venido desarrollándose gradualmente a través de los siglos, utilizando nuevos materiales y

operaciones más complejas, a tasas crecientes de producción y niveles más elevados de calidad.

Hasta la Revolución Industrial, que se inició en Inglaterra en los años 1750, los artículos habían sido producidos en lotes, apoyándose mucho en la mano de obra en todos los aspectos de la producción. Con la revolución industrial el poder mecánico suplantó al poder físico de los trabajadores, con varias máquinas movidas por cintas desde un eje impulsor común. La mecanización moderna se inició en Inglaterra y en Europa con el desarrollo de la maquinaria textil y de las máquinas herramientas para el corte de metales. Esta tecnología fue rápidamente trasladada a Estados Unidos, donde fue desarrollada aún más, incluyendo adelantos importantes en el diseño, manufactura y uso de piezas Intercambiables.

Pronto siguieron más desarrollos, dando por resultado numerosos productos. A partir del inicio de la década de 1940. Surgieron varios hitos en todos los aspectos de la manufactura [9].

Unos de los más relevantes e importantes fueron los referentes al sistema de manufactura y sus herramientas, tales como el Control Automático, Control Numérico (NC), por sus siglas en inglés Numerical Control; Manufactura Integrada por Computador (CIM), por sus siglas en inglés Computer Integrated Manufacturing; Robots Industriales, Sistemas de Manufactura Flexible, etc. Muchos coinciden que estos adelantos constituyen la segunda revolución industrial.

La aplicación y acabado que se emplea para los materiales de ingeniería. Lo anterior incluye cambios en la geometría del material, alteración de sus propiedades, operaciones de ensamble y también su aspecto como el acabado superficial. El objetivo primario de todo proceso será producir un componente de la forma y dimensiones deseadas, con los acabados y propiedades requeridos, todo esto al menor costo y de forma sustentable. El concepto desarrollo sustentable es el resultado de una acción concertada de las naciones para impulsar un modelo de desarrollo económico mundial compatible con la conservación del medio ambiente y con la equidad social [10]. En relación a la manufactura, la sustentabilidad puede ayudar a las organizaciones a lograr mejor desempeño operacional y mejora en el desempeño

ambiental, apoyando los esfuerzos de sustentabilidad de las plantas e impactando directa y positivamente los resultados financieros, impacto de la huella de carbono, cultura de sustentabilidad de la organización y satisfacción de los empleados. El tema es muy importante si se considera que la manufactura a nivel global consume grandes cantidades de recursos y genera enormes cantidades de desperdicios, baste decir que la manufactura a nivel mundial consume un tercio de la energía mundial y genera el 36% del total del CO<sub>2</sub>, el principal gas de efecto de invernadero. Es indudable que la supervivencia, prosperidad y dominio de la raza humana sobre la tierra se debe en gran parte a que su inteligencia le hizo posible la manufactura de herramientas y objetos diversos. Ciertamente que el camino recorrido ha sido largo y el proceso lento.

Se calcula que deben haber transcurrido miles de años de prueba y error para que el hombre pudiera tallar herramientas, tales como el hacha de mano en la que se pueden ya notar algunas de las características geométricas de nuestras modernas herramientas de corte. Los procesos de manufactura que engloban cualquier producto son procesos de remoción de material mediante el arranque de viruta y mediante procesos no tradicionales como el uso del rayo láser o por troquelado químico, procesos de unión, de deformación volumétrica, procesos de polímeros, de limpieza y acabados, recubrimientos, tratamientos térmicos, de fundición, y procesos de formado de hojas o láminas metálicas.

El trabajo de conformado metálico de láminas data de 5000 a.C., cuando se fabricaban utensilios domésticos y joyería por repujado y estampado de oro, plata y cobre. Las operaciones de formado o preformado en los procesos de láminas metálicas se clasifican en doblado y embutido, cizallado y formado. De cizallado se derivan: troquelado, ranurado, punzonado y penetrado. De doblado y embutido se derivan: doblado, plegado, formado en rodillos y embutida profunda. De formado se derivan: formado por estirado, hidro formado, rechazado y formado por pulsos magnéticos.

Un ejemplo de las operaciones de formado o preformado son las partes producidas en las prensas con hojas metálicas conocidos como estampados (de la palabra estampa, usada por primera vez alrededor del año 1200 d. C., que significa “forzar hacia abajo” o “machacar”).

El trabajado metálico de láminas incluye operaciones de corte y formado realizadas sobre láminas delgadas de metal. El espesor del material puede ser tan pequeño como varias décimas de milímetro, pero la mayor parte de los espesores del metal están entre 0.4 mm y 6.0 mm. Cuando el espesor excede de 6.0 mm se le llama placa en lugar de lámina. El material que se usa en el trabajo metálico de láminas se produce por laminado.

El corte se usa para separar láminas grandes en piezas menores, para cortar un perímetro o hacer agujeros en una parte. El doblado y el embutido se usan para transformar láminas de metal en partes de forma especial. Las herramientas que se usan para realizar el trabajo con láminas se llaman punzón y dado, la mayoría de las operaciones con lámina metálica se ejecutan en máquinas herramientas llamadas prensas. Se usa el término prensa de troquelado para distinguir estas prensas de las prensas de forjado y extrusión. Los productos hechos de lámina se llaman troquelados o estampados. Para facilitar la producción en masa, las láminas de metal se introducen en la prensas frecuentemente en forma de tiras o rollos [11].

El troquelado implica el corte de una lámina de metal a lo largo de una línea cerrada en un solo paso para separar la pieza del material circundante. La parte que se corta es el producto deseado en la operación y se designa como la parte o pieza deseada. El perforado es muy similar al punzonado, excepto que la pieza que se corta se desecha y se llama pedacería. El material remanente es la parte deseada. Existen otra variedad de operaciones de corte, entre los que se encuentra el troquelado fino.

El troquelado fino, desarrollado en la década de 1960, es una operación de cizallado que se usa para cortar partes con tolerancias muy estrechas y obtener bordes rectos y lisos en un solo paso. Al principio del ciclo, una placa de presión con salientes en forma de V aplica una fuerza de sujeción contra la lámina adyacente al punzón, a fin de comprimir el metal y prevenir la distorsión.

El troquelado fino desciende entonces con una velocidad más baja de lo normal y con claros más reducidos para producir las dimensiones y los bordes de corte deseados. El proceso se reserva usualmente para espesores relativamente pequeño.

El micro troquelado y troquelado fino se puede relacionar en el actual trabajo debido a su complejidad por el tamaño de las piezas de los componentes electrónicos, que tienen una tendencia a ser cada vez más pequeños.

El proceso de troquelado fino es considerado un elemento crítico dentro de los procesos productivos, por tal motivo es de vital importancia lograr mayor eficiencia en la calidad del proceso. Una de las técnicas estadísticas más utilizadas para lograrlo es el diseño de experimentos. El diseño de experimentos es una herramienta importante en la ingeniería para mejorar el desempeño de los procesos de manufactura. Con la aplicación de estos métodos o técnicas estadísticas en el desarrollo de los procesos nos puede llevar a resultados en términos de mejorar el rendimiento de los procesos, reducir variabilidad y acercarnos a los requerimientos de metas o valor nominal, reducir el tiempo de desarrollo y reducir costos de procesos.

Los métodos de diseño de experimentos también juegan un rol importante en el diseño de actividades de ingeniería, cuando nuevos productos son desarrollados y los existentes son mejorados.

En los últimos 20 años se han visto importantes avances en la metodología de diseño de experimentos. Estos avances han sido tanto en la metodología como en el alcance de las aplicaciones. De particular interés es la aplicación de diseño de experimentos para los procesos productivos, el diseño, desarrollo y mejora de productos [12].

### **1.1.2 Técnicas de optimización de procesos en la manufactura**

El corte del metal es uno de los procesos de fabricación más importantes y ampliamente utilizados en las industrias de ingeniería. El estudio sobre las características de las herramientas, los materiales de entrada de trabajo y los parámetros de las máquinas influyen en la eficiencia del proceso y en las características de la calidad de la producción (o respuestas). Se puede obtener una mejora significativa en la eficiencia del proceso mediante la optimización de parámetros de proceso que identifica y determina las regiones de factores críticos de control del proceso que conducen a resultados deseados o respuestas con variaciones aceptables que garantizan un menor coste de fabricación [13].

Indrajit Mukherjee, Pradip Kumar Ray <sup>[14]</sup> estudiaron sobre los constantes cambios en las industrias manufactureras. Las aplicaciones de técnicas de optimización en los procesos de corte son esenciales para que una unidad de fabricación responda eficazmente a la severa competitividad y al aumento de la demanda de productos de calidad en el mercado. Los métodos de optimización en los procesos de corte de metales, considerados como una herramienta vital para la mejora continua de la calidad de salida en productos y procesos, incluyen el modelado de los parámetros de entrada-salida y parámetros en proceso y la determinación de condiciones óptimas de corte. Sin embargo, la determinación de condiciones de corte óptimas a través de modelos matemáticos rentables es un esfuerzo de investigación complejo, y a lo largo de los años, las técnicas de modelado (Statistical regression, Artificial neural network, Fuzzy set theory) y optimización (Taguchi method, Response surface design methodology, Mathematical iterative search algorithm, Genetic algorithm, Simulated annealing, Tabu search) han experimentado un desarrollo y expansión esenciales.

La tecnología de corte de metales ha crecido sustancialmente con el tiempo debido a la contribución de muchas ramas de ingeniería con el objetivo común de lograr una mayor eficiencia del proceso. En cualquier operación de corte de metal en varias etapas, el fabricante busca establecer la variable o variables controlables relacionadas con el proceso en sus condiciones operativas óptimas con el mínimo efecto de variables incontrolables o de ruido en los niveles y variabilidad de salida (s). Para diseñar e implementar un control de proceso efectivo para la operación de corte de metales mediante la optimización de parámetros, un fabricante busca equilibrar la calidad y el coste en cada etapa de la operación, lo que se traduce en una entrega mejorada y una garantía reducida o un fallo de campo de un producto considerado [14].

En este estudio se evalúa de forma crítica el potencial de aplicación de varias técnicas de modelización y optimización en procesos de corte de metales, clasificados bajo varios criterios, y se sugiere un marco genérico para la optimización de parámetros en procesos de corte de metales para los beneficios de la selección de un enfoque apropiado.

Problemas de optimización, incorpora el uso de una o más de las técnicas existentes de modelado y optimización, haciendo del marco un medio unificado y efectivo. Además, intenta proporcionar al usuario la flexibilidad necesaria para adoptar técnicas adecuadas basadas en su potencial y en la complejidad del problema, resaltando la importancia de la recopilación de datos y su análisis.

### **1.1.3 Reducción de pérdidas de los procesos de troquelado**

La literatura actual no está clara sobre cómo se pueden reducir las pérdidas de rendimiento, ya que hay un conocimiento limitado de la cantidad de chatarra que se genera, el costo de la chatarra y por qué se producen pérdidas de rendimiento.

Horton, Philippa M. Allwood, Julian M. <sup>[15]</sup> a través de un estudio de la industria, estiman que las pérdidas de rendimiento representan el 44% de la chapa utilizada en la producción de vehículos de pasajeros. La mejora de la eficiencia del material de producción hasta el 70% reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> y los costes de material de la estructura de la carrocería de chapa en un 26% y un 24%, respectivamente. Esto podría proporcionar una oportunidad de ahorro anual global de 25 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> y \$162, 204,000.00 pesos. La evaluación de un vehículo de estudio de caso revela que las pérdidas de rendimiento se producen cuando el material es simplificado a una forma regular, o aumentado en tamaño debido al diseño de la pieza, material de soporte y superficies aditivas. Un estudio de los procesos de negocio identifica que las pérdidas de rendimiento se incrementan para satisfacer el diseño de las piezas y los requisitos de fabricación. Los resultados de los estudios de procesos y componentes muestran que algunas pérdidas de rendimiento son inevitables con la tecnología existente de corte y conformado. Sin embargo, las variaciones en las pérdidas de rendimiento identificadas en el estudio de la industria indican una oportunidad para la mayoría de las organizaciones de mejorar la utilización de materiales.

Una empresa motivada puede implementar las estrategias de mejora del rendimiento si consideran la utilización del material antes, generan objetivos específicos y permiten mejoras en el proceso. Las acciones que permiten implementar estrategias de mejora del rendimiento incluyen:

- Introducir y asegurar la implementación de pautas de proceso, con objetivos específicos de utilización de materiales para todas las etapas del proceso de diseño.
- El aumento de la colaboración inter funcional y la capacitación en Diseño-para-Manufactura podrían mejorar la capacidad organizativa para diseñar componentes para una utilización máxima del material.
- La evaluación de los costos y beneficios de la mejora del rendimiento podría aumentar la motivación para el cambio y aumentar la prioridad de la utilización de los materiales en comparación con otros criterios de desempeño.
- Reducir la dependencia de los datos de sustitución podría facilitar la mejora continua y la innovación del proceso en el diseño y la fabricación de piezas de materiales eficientes.
- Se podrían lograr mejoras a largo plazo a través de la investigación de tecnologías que permitan, como el corte láser mejorado, los espacios en blanco soldados a medida y los avances en la tecnología de estampado.

Esta investigación despierta el interés de reducir el nivel de desperdicio provocado en los procesos de corte así como en despertar el interés de hacer algo al respecto en torno al medio ambiente, hace conciencia del impacto que genera no tomar influencia en el tema del que somos responsables todos los que formamos parte del sistema económico de nuestro mundo.

## **1.2 Principales aportaciones de los procesos de láminas metálicas**

El ingeniero está involucrado constantemente en procesos que deben ser mejorados a través del uso de nuevas tecnologías, materiales y equipos, que proporcionen un mejor desempeño y resultados satisfactorios. Ejemplo de esto es el proceso de láminas metálicas, su tendencia en relación con la industria electrónica, pues requiere ser analizado y monitoreado al cien por ciento. En este proceso se pueden analizar distintos factores que determinan significativamente la calidad del producto, ya sea cortado o formado se puede determinar si el producto se considerada aceptable o no. A continuación se hace referencia a aplicaciones estadísticas que tuvieron como resultados mejoras notables en la calidad del producto.

### **1.2.1 Optimización de procesos de troquelado fino utilizando diseño de experimentos**

En la nano escala, a menudo hay relaciones muy complejas entre parámetros de diseño de entrada y productos de proceso o producto. Sería prohibitivamente mucho tiempo realizar todos los experimentos combinatoriamente posibles para comprender estas relaciones. Sin embargo, el diseño estadístico de experimentos es una técnica que puede ser utilizada para explorar eficientemente las relaciones y desarrollar una mayor comprensión. En consecuencia, la metodología DoE, por sus siglas en ingles Design of experiments, se está convirtiendo cada vez más en un protagonista central en el avance de la nanotecnología y nano manufactura [16].

La herramienta estadística de Diseño de Experimentos tiene una amplia aplicación en diversos procesos, y la ingeniería no queda exenta de esto, por lo que a continuación se describen dos de las investigaciones relacionadas al uso de esta metodología para la optimización de procesos de láminas metálicas.

Sutasn Thipprakmas <sup>[17]</sup> analizó las características especiales del proceso de troquelado fino como el uso del sujetador de anillo en V. La geometría del anillo en V, es decir, su ángulo y altura, además de su posición. Hay varios parámetros con diferentes niveles de ajuste, que pueden afectar a la superficie del corte.

En este estudio se realizó la simulación de elementos finitos, la técnica de Taguchi y el análisis de varianza (ANOVA) para investigar el grado de importancia de los parámetros del sujetador del anillo V. Los resultados indicaron que la altura, la posición tienen una influencia importante en el proceso de troquelado fino, seguido por el ángulo. La combinación de la simulación FE por sus siglas en ingles finite element, el método de Taguchi y la técnica de ANOVA fue una herramienta eficaz para predecir el grado de importancia de los parámetros del sujetador del anillo V en el proceso corte, además de obtener una mejora en la calidad de las partes mediante la optimización de estos parámetros.

En este estudio se utilizó el software comercial DEFORM-2D, como herramienta para llevar a cabo la predicción del acabado de la superficie en el corte. El método de Taguchi y el análisis de varianza (ANOVA) se llevaron a cabo para examinar el grado

de importancia de los parámetros del sujetador del anillo V en relación con las características de la superficie del corte. Se realizaron experimentos de corte fino para validar los resultados de la FE-simulación. La efectividad de la combinación de las técnicas de simulación de FE y análisis estadístico se evidencia considerando el experimento de laboratorio de una pieza circular con 60mm de diámetro y 5mm de espesor. Por lo tanto, la técnica de ANOVA es capaz de especificar los parámetros del sujetador de anillo en V que influyen marcadamente en las características de la superficie de corte fino y proporcionar información sobre el grado de importancia de cada parámetro en el proceso de corte. La altura y la posición tienen una gran influencia sobre la superficie delgada, seguido por el ángulo. Los resultados demostraron que la calidad de las partes en este proceso de corte fino en términos de superficie de cizallado depende del valor óptimo de los parámetros del sujetador del anillo en V y de su combinación favorable.

La técnica de Taguchi, introducida por Genichi Taguchi a principios de los ochenta, es una técnica estadística para obtener la combinación de parámetros de diseño y para reducir las variaciones de la calidad del producto en los procesos de producción. En base al estudio realizado por Sutasn Thipprakmas utilizando el método de simulación FE, en sociedad con el método Taguchi y el análisis de varianza (ANOVA) resultaron efectivos para examinar el grado de importancia de los parámetros del sujetador del anillo en V. Los resultados de ANOVA ilustraron la influencia de cada parámetro sobre la superficie de cizallado. La altura y la posición del sujetador del anillo en V, con sus contribuciones porcentuales calculadas aproximadamente del 40%, ejercen una influencia importante en el proceso de troquelado, seguido del ángulo. Además, los resultados de ANOVA fueron confirmados de nuevo por una simulación adicional FE, en los otros parámetros. La combinación de la simulación FE, el método de Taguchi y la técnica de análisis de varianza (ANOVA) fue una herramienta eficaz para predecir el grado de importancia de los parámetros en el proceso, además de mejorar la calidad de las características superficiales, por optimización de los parámetros del sujetador del anillo en V.

En base a lo anterior se observa que un elemento importante en el proceso de corte es el sujetador o pisador. En el troquelado del proceso a analizar de este proyecto no cuenta con un pisador, aunque no aplica en el sujetador una muesca en forma de V por el espesor tan pequeño que se maneja en el esqueleto o terminales.

### **1.2.2 Troquelado aplicado a componentes electrónicos**

La rápida evolución de los componentes electrónicos o micro componentes está planteando mayores exigencias a los circuitos integrados (IC). La tendencia hacia menores dimensiones impone exigencias rigurosas sobre la calidad del corte.

Lee, W.B., Cheung, C.F., Chan, Chiu, W.M. <sup>[18]</sup> estudiaron los efectos de la separación del troquelado, los materiales de las terminales, los materiales de la herramienta de corte, los recubrimientos de herramientas de corte, el cizallado del punzón y la velocidad de corte sobre el desgaste de las herramientas de corte del troquel. También se exploran las relaciones entre el desgaste del flanco del punzón, la altura de la rebaba y la fuerza de corte del troquel.

Los resultados obtenidos por los investigadores, de acuerdo a su experimentación indican que la cantidad de desgaste del flanco del punzón aumenta con un incremento del porcentaje de holgura del troquel. Las herramientas hechas de HSS exhiben la más pobre resistencia al desgaste. El desgaste por rodaje en el filo y el flanco del punzón ha demostrado ser sustancialmente reducido por el recubrimiento de nitruro de titanio por PVD y el tratamiento superficial por nitruración de plasma. Se consiguió mayor resistencia al desgaste por nitruración con plasma que por recubrimiento de TiN. Se ha encontrado que las herramientas hechas de carburo (WC) tienen la mejor resistencia al desgaste entre los materiales de herramienta y las herramientas con recubrimiento que se están investigando.

Se encontró que las aleaciones de níquel A42 causan mayores cantidades de desgaste que la aleación de cobre EFTEC64T. La provisión de una cantidad apropiada de cizallamiento en la cabeza del punzón demostró ser capaz de reducir significativamente el desgaste en el filo y el flanco del punzón. Cuanto mayor es el ángulo de corte del

punzón, mayor es la reducción resultante. Sin embargo, el ángulo de corte excesivo del punzón conduce a la formación de rebabas triangulares que es indeseable en aplicaciones prácticas. Tanto el desgaste del punzón como la altura de las rebabas se incrementaron al aumentar la velocidad de corte del troquelado. El cambio en los perfiles de los bordes de corte, a medida que la velocidad aumenta de 124 a 262 mm/s, sugiere un cambio en el mecanismo de desgaste en el rango de velocidad que se está investigando. En el análisis de fuerzas, se encontró que la fuerza de corte máxima aumentaba exponencialmente con el aumento del desgaste de los flancos de punzón en el corte con diferentes porcentajes de separación entre el punzón y el material a cortar (terminales). En conjunto, los hallazgos experimentales proporcionan una evidencia importante para la optimización de la vida útil de la herramienta y la calidad del corte de las terminales para paquetes de IC.

Esta investigación deja en evidencia aciertos y posibles errores que se encuentran en el diseño actual del troquel que se emplea para el corte de los componentes electrónicos que se va investigar, por ejemplo si se está empleando el material apropiado al punzón y matriz, piezas claves en efectos del cizallado.

### **1.2.3 Aportaciones en los procesos de micro-troquelado**

Con el desarrollo de sistemas micro-electromecánicos por sus siglas en inglés (MEMS), los micro maquinados, incluyendo la fabricación de tornillos miniatura, micro-engranajes con procesos de troquelado químico y la elaboración de circuitos integrados (CI), están siendo ampliamente demandados y utilizados en el campo de la micro-electrónica, bioingeniería y la industria aeroespacial. En comparación con la tecnología de fabricación basada en MEMS, el proceso de micro troquelado es uno de los procesos más adecuados para fabricar micro partes debido a las ventajas como alta productividad por la velocidad del proceso y bajo costo. Sin embargo, cuando el tamaño de las características de las partes se reduce de la macro escala hacia la micro escala, el comportamiento de la deformación plástica está determinado por la estructura interna de los materiales como el conjunto de unos pocos granos situados en las regiones de deformación donde se producen efectos negativos en la calidad del

corte. Los materiales convencionales ya no son válidos en el análisis del comportamiento de micro troquelado.

Jie Xua, Bin Guoa, Chunju Wanga, Debin Shana <sup>[19]</sup> investigaron el claro y efectos del tamaño del grano sobre el comportamiento de la micro deformación y fractura en el micro-troquelado de la lámina de latón.

En este trabajo, se estudió el procedimiento de micro-troquelado para investigar los efectos del corte de la lámina de latón, considerando el espesor de la lámina, el claro y el tamaño del grano. Se obtuvieron los siguientes desenlaces:

(1) La resistencia al cizallamiento aumenta con la disminución del espesor de la lámina y el mecanismo de fractura cambia significativamente con la ductilidad del material que está relacionado con una mala orientación o dirección del grano.

(2) El comportamiento de deformación del micro-troquelado no sólo se relaciona con el claro entre el punzón y la matriz, sino que también se relaciona con el tamaño de grano de la lámina de latón. La relación entre el claro y el tamaño de grano  $c / d$  se convierte en uno de los principales factores que influyen en el comportamiento de deformación del micro-troquelado.

(3) La curva de la fuerza aplicada a distintos materiales de grano fino son repetibles sin embargo, las curvas de la muestra de lámina de grano grueso muestran una fuerte variación no sólo en la fuerza de supresión máxima, sino también en el perfil de la curva. El tamaño del grano no tiene efecto sobre el mecanismo de fractura pero la geometría de la sección transversal del micro-orificio varía significativamente en el perfil del borde del material, con bordes afilados o machucados.

(4) Se estableció un nuevo modelo de efecto de tamaño de micro-troquelado considerando claro y el tamaño de granos, los resultados muestran que la resistencia al cizallamiento final alcanza un valor extremo cuando la relación de  $c / d$  es igual a 1, lo

que también verifica la conclusión de que la relación de  $c / d$  es uno de los principales factores para influir en el comportamiento de deformación de micro-troquelado de hojas de latón.

Aunque la investigación deja en evidencia varios puntos importantes para el actual proyecto interesa la relación del claro entre la matriz y el punzón, la importancia de no cortar en forma transversal de la dirección del grano y aporta que entre menor espesor a cizallar mayor es la resistencia, esto parece ilógico en un principio.

#### **1.2.4 La tendencia a la miniaturización en el campo de la electrónica**

En la actualidad, el campo de la producción electrónica, así como muchos otros campos técnicos, se caracteriza por una miniaturización progresiva causada por una tendencia general hacia una mayor integración y densidades de empaquetamiento. Simultáneamente a esta tendencia, las piezas electrónicas individuales, que a menudo se producen en grandes cantidades, también se someten a miniaturización y, como resultado, a una complejidad geométrica creciente. Debido a la tendencia a la miniaturización, las ventajas específicas de la formación de metal, especialmente la alta productividad y la alta utilización de material, no pueden explotarse en la misma medida en el campo de la producción de productos electrónicos como en la conformación convencional de metales. Las razones para esta situación son las crecientes demandas de herramientas y tecnología de máquina que resultan de la miniaturización y el aumento de la complejidad, así como la ausencia de conocimientos básicos sobre los mecanismos que caracterizan la formación de metal en el campo de las dimensiones más pequeñas de la pieza de trabajo.

M. Geiger F. Vollertsen, R. Kals <sup>[20]</sup> investigaron sobre los procesos de láminas metálicas en torno a los retos que presenta actualmente, especialmente por la tendencia a las nanotecnologías.

Una razón importante para esta situación es el hecho dado que los mecanismos que caracterizan la formación de metal en el campo de las dimensiones más pequeñas de la pieza de trabajo son apenas conocidos en este momento, con respecto a la miniaturización de la pieza de trabajo.

Se distinguen las dimensiones en el metal que forman dos clases de efectos de tamaño:

- Los efectos que pueden ser explicados obedeciendo la similitud de tamaño o usando modelos convencionales se llaman efectos de primer orden.
- Los efectos que se producen incluso si se usa la similitud de tamaño y los modelos clásicos, se denominan efectos de tamaño de segundo orden.

Con respecto a estos efectos de tamaño, se realizaron investigaciones fundamentales sobre el campo de temperatura y el estrés de flujo. Para ambos se mostró, de qué manera la miniaturización de las dimensiones de la pieza de trabajo puede conducir a un cambio de las condiciones de contorno en la formación de metal.

Se investigó el doblado con láser, el doblado de aire y el proceso de punzonado con respecto a los efectos respectivos de la miniaturización. Se demostró que una descripción precisa de estos procesos requiere un conocimiento detallado del cambio de los mecanismos de formación predominantes debido a la miniaturización.

### **1.3 Aplicación del diseño de experimentos en procesos de troquelado**

Emad Al-Momani, Ibrahim Rawabdeh <sup>[21]</sup> llevaron a cabo una investigación donde analizaron un proceso de troquelado. Aquí se definieron las variables de entrada como el tipo de material, su espesor, la claridad u holguras entre el set de matriz y ponche y el pisador o sujetador del material y su variable de respuesta “y” que es la altura de la rebaba en el borde del material cizallado.

El experimento permitió estudiar los efectos de parámetros del proceso tales como el tipo de material, la holgura del troquel, el espesor de la lámina y la fuerza de soporte del pisador y sus interacciones sobre la geometría del material sobre el borde cortado especialmente la altura de las rebabas. La combinación de los métodos FEA y diseño de experimentos se utilizan con el fin de obtener una mejor comprensión de la respuesta de fabricación por troquelado. Los estudios indican que los tipos de material, así como la geometría y las características de las herramientas y su configuración influyen en la altura de las rebabas del borde cizallado. Esta investigación muestra que,

para minimizar la altura de las rebabas, las holguras deben fijarse en aproximadamente un 5% del tamaño del material, sin casi ninguna fuerza de soporte del material. Cuando no se utiliza el pisador o sujetador del material, el proceso es ligeramente más complejo a los cambios de holgura que cuando se usa una fuerza de retención en el material. No se recomienda utilizar una fuerza cero de soporte, más bien un valor pequeño en el orden de aproximadamente el 2% de la fuerza de retención puede impedir que el esqueleto restante se mueva fuera del plano. La investigación presentada del proceso de troquelado permite predecir los parámetros óptimos del proceso. Es posible reducir el tiempo de entrega usando el Análisis de Elementos Finitos en conjunción con la técnica de Diseño de Experimento en el proceso de diseño, donde las simulaciones por computadora pueden reemplazar a muchos experimentos que consumen mucho tiempo. Se necesitan más investigaciones para explorar más parámetros y condiciones de operación para desarrollar un modelo general para más tipos de materiales. Se recomienda realizar experimentalmente el proceso de borrado que combina el conjunto óptimo de parámetros y controlar su calidad de salida.

El troquelado de láminas metálicas es un proceso ampliamente utilizado en la industria para altos volúmenes de producción. Existen lineamientos generales para este proceso pero no son suficientes para superar las dificultades en el diseño de estos procesos, donde los requisitos para menos tiempo de ciclo y dimensiones exactas del producto se vuelven más exigentes. El diseño de los procesos en la práctica industrial sigue basándose en gran medida en las experimentaciones y a menudo se rige por largas y costosas iteraciones de ensayo y error causadas por un conocimiento limitado, sobre todo empírico, de estos procesos. Existe la necesidad de un nuevo método que permita la reducción de la opción de prueba y error en el diseño del proceso troquelado.

El Método de Elemento Finito y el Diseño de Experimentos se utilizan para lograr los objetivos del modelo. La combinación de ambas técnicas se propone para dar lugar a una reducción del costo experimental necesario y el esfuerzo, además de obtener un mayor nivel de verificación.

Investigaciones actuales sobre el control de operaciones de troquelado tiene como objetivo mejorar y controlar la calidad de los componentes. La motivación es la reducción del volumen de rechazo, la reducción del control manual de la calidad y el alto costo del remplazo de herramientas después de catastróficas fallas [22]. El troquelado es una operación de fabricación tan antigua como la tecnología misma, sus aplicaciones van desde componentes muy ligeros hasta pesados y maquinaria [23].

Los métodos numéricos proporcionan una herramienta general para analizar Geometrías arbitrarias y condiciones de carga. Entre los métodos numéricos, FEA por sus siglas en ingles Finite Element Analysis ha sido ampliamente utilizado con éxito; sin embargo, este tipo de análisis requiere la generación de un gran conjunto de datos con el fin de obtener resultados razonablemente precisos y consume grandes inversiones en tiempo de ingeniería y recursos informáticos [24].

En el área de fabricación, el diseño de experimentos se encuentra para ser una técnica estadística eficiente que se puede utilizar para varias investigaciones experimentales. El diseño de experimentos es una de las herramientas más utilizadas para investigar profundamente las causas ocultas de la variación del proceso. Es un enfoque sistemático y riguroso para la resolución de problemas de ingeniería que aplica principios y técnicas en la etapa de recolección de datos para asegurar la generación de conclusiones válidas, defendibles y sostenibles. En el proceso de troquelado, el diseño experimental se considera un enfoque poderoso para el desarrollo de productos y procesos, y para mejorar el rendimiento y la estabilidad de un proceso en curso [25]. Se sabe que las optimizaciones de los procesos de fabricación y el control de parámetros tienen un impacto directo en la producción. En base a la investigación delbrahim Rawabdeh y Emad Al-Momani se determina que la holgura en el proceso actual debe ser de .00025” que corresponde al 5% del espesor de la lámina a cortar además deja en evidencia la importancia del uso del pisador.

### 1.3.1 Contribuciones importantes en la aplicación del diseño de experimentos

La metodología de diseño de experimentos es una herramienta con un enfoque sistemático para optimizar el rendimiento del proceso. En la industria de la fabricación la metodología DoE se ha vuelto una técnica muy útil para las investigaciones experimentales. El diseño de experimental es una herramienta poderoso para el desarrollo de productos [26].

Yolanda A. Báez, Jorge Limón, Diego A. Tlapa y Manuel A. Rodríguez <sup>[27]</sup> presentan un trabajo que trata sobre la aplicación de la metodología de SEIS SIGMA (DMAMC), por sus siglas en español Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, así como los métodos Taguchi para resolver el problema de baja resistencia a la prueba de jalón de un diodo emisor de luz (LED) de una compañía electrónica del noroeste de México, el cual es utilizado en el ensamble de teléfonos celulares. Al término de este proyecto se logró una mejora significativa al aumentar la capacidad del proceso de 0.56 a 1.45 y un impacto en la reducción de los costos, tan solo por eliminación de desperdicio, del orden de 130 mil dólares estadounidenses anuales. Para lo anterior no se requirió de inversión adicional, únicamente fue necesario controlar el ajuste de cada uno de los factores importantes del proceso. Un aspecto importante es que para implementar la mejora, no fue necesaria ninguna inversión, sino solamente controlar el ajuste de cada uno de los factores en los niveles establecidos. Antes de este proyecto no existía una forma fija de operar el proceso y éste se modificaba dependiendo del punto de vista o criterio de los operadores o del supervisor de línea. Los resultados obtenidos en éste proyecto pretenden servir de estímulo a la empresa para el desarrollo de futuros proyectos y mejora de sus procesos mediante la aplicación de la metodología SEIS SIGMA.

Martín Tanco, Elisabeth Viles, Laura Ilzarbe, María Jesús Álvarez <sup>[28]</sup> presentan una variedad de actividades tales como mejorar los diseños de productos, mantener, controlar y mejorar el proceso de fabricación, mantenimiento y reparación de productos, entre otros. Como la experimentación es una tarea frecuente en esas actividades, los ingenieros terminan usando estadísticas independientemente de sus antecedentes. En

su artículo resaltan que SEIS SIGMA ha hecho del diseño de experimentos aún más necesario, ya que es una herramienta clave de esta metodología. Presenta una metodología validada para simplificar y aclarar la aplicación del DoE, guiándolos a través de todo el proyecto con actividades estructuradas.

## Capítulo 2 Marco conceptual

### 2.1 Manufactura en la industria electrónica en México

Las principales empresas de la industria electrónica a nivel mundial tienen operaciones en México, a fin de atender a los mercados de Estados Unidos y Canadá. Así, 9 de las 10 principales empresas transnacionales de servicios de manufactura de electrónicos (EMS) están ubicadas en el país. Algunos ejemplos de empresas de nivel mundial con presencia en México son Samsung, LG, Toshiba, Foxconn, Flextronics e Intel.

El sector electrónico se centra en aparatos o componentes que procesan algún tipo de información. Esta industria se divide en cinco grandes subsectores: audio y video, computación y oficina, semiconductores, comunicaciones, y equipo médico e instrumentos de precisión, medición, control y ópticos [29].

El sector electrónico y el sector eléctrico suelen confundirse, por lo que es importante resaltar la diferencia primordial entre ellos. Si la función principal del aparato o componente es transformar la energía eléctrica a otra forma de energía, entonces se considera eléctrico; por otro lado, si la función del aparato o componente es procesar algún tipo de información, entonces se considera electrónico [30].

El Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte 2014 (SCIAN) divide la industria electrónica en seis grandes subsectores como lo muestra la tabla 2-1.

**Tabla 2- 1 Descripción de la industria electrónica por subsector [30].**

| <b>Código ISIC Rev.3</b> | <b>Clasificación SCIAN</b> | <b>Subsector</b>         | <b>Descripción</b>   |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------|--|
| <b>D30</b>               | 3341                       | Computación y oficina    | Computadoras, impresoras, fotocopiadoras, servidores de red, sistemas para almacenamiento de datos, tarjetas madre, monitores, teclados, equipo periférico, entre otros. |
| <b>D321</b>              | 3344                       | Componentes electrónicos | Manufactura de diodos, transistores, tiristores, circuitos integrados electrónicos analógicos y digitales, entre otros.  |

|             |              |   |   |
|-------------|--------------|---|---|
| <b>D322</b> | 3342         | Comunicaciones  | Máquinas contestadoras, teléfonos fijos, faxes y equipo de telecomunicaciones móviles incluyendo teléfonos celulares, entre otros.  |
| <b>D323</b> | 3343         | Audio y video   | Equipo audiovisual que comprende los reproductores de CD y de DVD, los sistemas de Hi - Fi, teatro en casa, sistemas de entretenimiento, sistemas de audio digital portátil, radios, televisores y grabadoras de vídeo, las consolas de videojuegos de uso doméstico y portátil, , entre otros. |
| <b>D33</b>  | 3345, y 3346 | Instrumentos de medición, control, navegación y equipo médico electrónico, y medios magnéticos y ópticos. | Manufactura de equipo médico, instrumentos de medición, control, navegación, instrumentos ópticos, equipo fotográficos y relojes, entre otros.  |

### 2.1.1 Industria electrónica en Baja California

De acuerdo con un estudio de la dependencia denominado “Sectores industriales de Baja California”, los clústeres clave para la entidad son el automotriz, electrónico, aeroespacial, médico y de energías renovables. El sector con el mayor número de empresas y considerado como el primero en establecerse en el estado como industria es el electrónico, con más de 200 plantas dedicadas a la manufactura y ensamblaje de dispositivos para televisores, celulares, electrodomésticos, computadoras, entre otros productos [31].

### 2.2 Troquelado de metales

En términos sencillos, el troquelado es un método para trabajar láminas metálicas en frío, en forma y tamaño predeterminados, por medio de un troquel y una prensa. El troquel determina el tamaño y forma de la pieza terminada y la prensa suministra la fuerza necesaria para efectuar el cambio.

Cada troquel está especialmente construido para la operación que va a efectuar y no es adecuado para otras operaciones. El troquel tiene dos mitades, entre las cuales se coloca la lámina metálica. Cuando las dos mitades del troquel se juntan se lleva a cabo

la operación. Normalmente, la mitad superior del troquel es el punzón (la parte más pequeña) y la mitad inferior es la matriz (la parte más grande). Cuando las dos mitades del troquel se juntan, el punzón entra en la matriz.

En la matriz se realizan unas aberturas, por medio de varios métodos. La forma del punzón corresponde a la abertura de la matriz pero es ligeramente más pequeño, en una cantidad igual a la determinada por el "Juego entre matriz y punzón" requerida. El tipo y espesor del material y la operación que se va a llevar a cabo establecen dicho juego.

Las dos partes se encuentran montadas en una porta troquel: la matriz montada sobre la base y el punzón en una zapata superior. El uso de un porta troquel asegura una alineación adecuada del punzón y la matriz, sin importar el estado de la prensa. Los troqueles más simples son los que se emplean para hacer agujeros en una lámina.

La prensa usada para llevar a cabo estos cambios de forma tiene una mesa estacionaria o platina, sobre la cual se sujeta la matriz. Una corredera guiada o carro, que sujeta el punzón, se mueve hacia arriba y abajo perpendicularmente a la platina. El movimiento y la fuerza del carro son suministrados por un cigüeñal, un excéntrico o cualquier otro medio mecánico. También se emplean prensas accionadas neumáticamente e hidráulicamente.

El troquelado de láminas metálicas incluye el corte o cizallado, el doblado o formado y las operaciones de embutido superficial o profundo. El corte alrededor de toda la periferia de una pieza se llama "recortado". El corte de agujeros en una pieza de trabajo se llama "punzado" o, "perforado".

### **2.2.1 Troquelado convencional**

Las piezas troqueladas pueden maquinarse después del recortado o doblado si se requieren dimensiones más precisas de las que pueden producirse por troquelado, o cuando se requieren formas que no son factibles solamente por troquelado. Ejemplos de esto es el escariado de los agujeros centrales de poleas o engranes troquelados, superficies rectificadas para darles planicidad y ranuras o áreas de alivio que requieren un cambio en el espesor de la pieza.

### **2.2.2 Características y aplicaciones del troquelado de metales**

Quizá la principal característica de las piezas metálicas troqueladas es que, con unas cuantas excepciones, el espesor de la pared es esencialmente el mismo en toda la pieza. Las piezas troqueladas terminadas son, algunas veces, bastante complicadas en forma, con muchas salientes, brazos, agujeros de varias formas, huecos, cavidades y secciones levantadas. En todos los casos, el espesor de la pared es esencialmente uniforme. No se realizan repujados gruesos del tipo que se encuentra en muchos vaciados.

Los troquelados se llevan a cabo en espesores que varían desde 0.025 mm hasta 9 mm de espesor. El tamaño de las piezas troqueladas va desde la más pequeña usada en los relojes de pulsera, hasta los, grandes tableros empleados en camiones o aviones.

El ingeniero de diseño debe tener presente el borde característico de una pieza troquelada, especialmente si incluye superficies de rozamiento o si, por apariencia u otras razones, se requieren bordes tersos. El diseñador también debe estar consciente de las rebabas que quedan en un lado de las piezas troqueladas y ser cuidadoso al diseñarlas, con objeto de poder removerlas con facilidad o que no interfieran con las subsecuentes operaciones o funcionamiento [32].

### **2.3 Dados de corte**

Casi todas las operaciones de trabajo en prensas que se describen arriba se ejecutan con punzones y dados convencionales. La herramienta a la que nos referimos específicamente aquí es un dado. Una herramienta diseñada a la medida de la parte que se produce. Se usa frecuentemente el término dado troquelador (o de estampado) para los dados de alta producción.

#### **2.3.1 Componentes de un dado de corte**

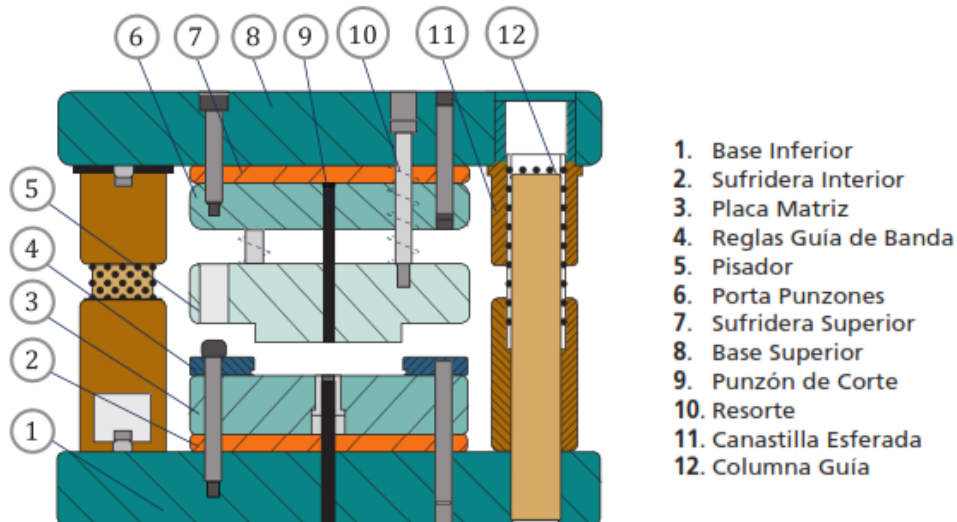
Componentes de un dado que ejecuta una operación simple de corte de formas. Los componentes de trabajo son el punzón y matriz. El punzón y matriz se fijan a las porciones superior e inferior del conjunto del dado, llamados respectivamente el porta punzón (o zapata superior) y el porta matriz (zapata inferior). El conjunto incluye

también barras guía y bujes para asegurar el alineamiento apropiado entre el punzón y matriz durante la operación. La porta matriz se fija a la base de la prensa y el porta punzón se fija al pistón. El movimiento del pistón ejecuta la operación de prensado o corte. La figura 2.1 muestra las partes de un dado de corte simple.

Además de estos componentes, un dado para corte de formas o punzonado debe incluir un medio para evitar que se peguen las láminas al punzón cuando éste regresa hacia arriba, después de la operación. El agujero que se genera en el material es del mismo tamaño que el punzón y tiende a pegarse al punzón antes de su retiro. El dispositivo del dado que separa la lámina del punzón se llama separador, el cual consiste frecuentemente en una simple placa fijada al dado con un agujero ligeramente más grande que el diámetro del punzón.

Para dados que procesan tiras o rollos de lámina metálica, se requiere un dispositivo que detenga el avance de la lámina que se alimenta al dado entre cada ciclo de prensado. El dispositivo se llama tope.

Los topes van desde simples pernos localizados en la trayectoria de la tira para bloquear su avance, hasta complejos mecanismos sincronizados que se levantan y retraen con cada acción de la prensa.



**Figura 2. 1 Partes básicas de un troquel. Fuente [33]**

### 2.3.2 Tipos de dados

Aparte de las diferencias entre los dados de corte, doblado y embutido, hay otras que se refieren al número de operaciones separadas que se ejecutan en cada acción de la prensa y cómo se realizan dichas operaciones.

El tipo de dado mostrado en la figura 2.1 ejecuta una sola operación con cada golpe de la prensa y se llama dado simple.

En el trabajo con prensas hay dados más complicados como dados compuestos, dados combinados y dados progresivos. Un dado compuesto realiza dos operaciones en un solo lugar, tales como corte de formas y punzonado, o corte de formas y embutido. Un dado combinado es menos común; ejecuta dos operaciones en dos diferentes posiciones del dado. Algunos ejemplos de aplicaciones en este dado incluyen corte de discos para dos diferentes partes o corte de discos y después doblado de la misma parte.

**Troquel progresivo.** Un dado progresivo ejecuta dos o más operaciones sobre una lámina de metal en dos o más posiciones con cada golpe de prensa. La parte se fabrica progresivamente. El rollo de lámina se alimenta de una posición a la siguiente y en cada uno de estos lugares se ejecutan las diferentes operaciones (por ejemplo, punzonado, muescado, doblado y perforado). La parte sale de la última posición

completa y separada (cortada) del rollo original. El diseño de un dado progresivo empieza con la disposición de la parte sobre la tira o rollo y la determinación de las operaciones que se van a ejecutar en cada posición. El resultado de este procedimiento se llama desarrollo de tira.

Los dados progresivos pueden tener una docena o más posiciones. Los dados de troquelado son los más complicados y costosos, pero se justifican económicamente para partes complejas que requieren operaciones múltiples a altas velocidades de producción. La figura 2.2 muestra un dado progresivo.

**Troquel de corte fino.** La tecnología de corte fino, es un proceso de trabajo de la técnica de troquelado que hace posible producir en una sola operación componentes de acabado preciso, con un corte limpio por todo el espesor del material, con tolerancias dimensionales estrechas, libres de desgarros y grietas en sus áreas funcionales. La figura 2.4 muestra este tipo de herramienta.

Las operaciones secundarias tales como fresado, rectificado, mandrilado o taladrado, pueden ser eliminadas.

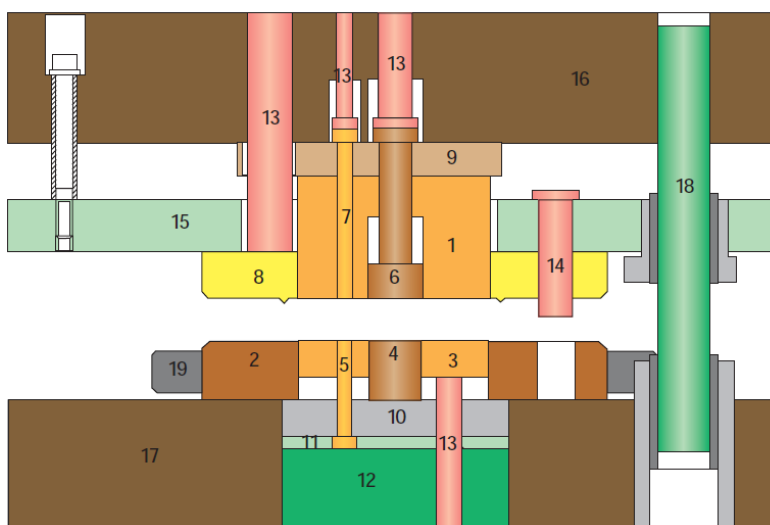
El método de realizar satisfactoriamente el troquelado de precisión es dominar la tecnología del corte fino, esta tecnología incluye las siguientes áreas:

- Prensas de corte fino
- Herramientas de corte fino
- Materiales de corte fino
- Lubricantes de corte fino

**Troquel con punzón fijo.** El sistema de troquel con punzón fijo es usado para diferentes tipos de piezas, en particular para la fabricación de piezas de gran espesor y de gran tamaño [34]. La figura 2.3 hace referencia a este tipo de herramienta.

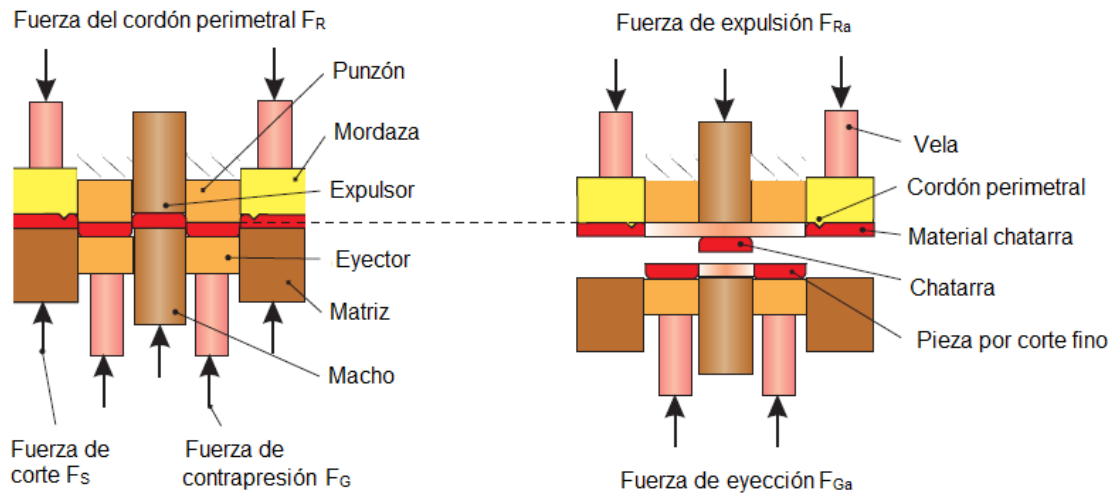


**Figura 2. 2 Troquel progresivo de 10 etapas para alta producción. Nótese que las guías ya no emplean bujes sino sistemas antifricción. Fuente [35]**



|                      |                      |                     |                         |                     |
|----------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 1.Punzón             | 2.Matriz             | 3.Eyector           | 4.Machos                | 5.Machos            |
| 6.Expulsor           | 7.Expulsor           | 8.Mordaza           | 9.Placa de porta punzón | 10.Placa de presión |
| 11.Distanciadores    | 12.Taco de presión   | 13.Velas de presión | 14.Clavijas             | 15.Placa guía       |
| 16.Bastidor superior | 17.Bastidor inferior | 18.Columna          | 19.Cincho               |                     |

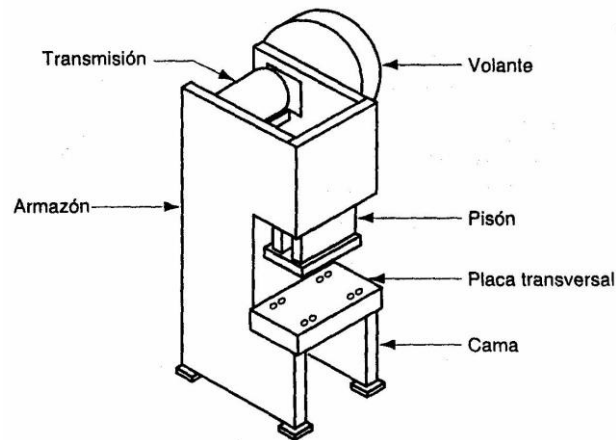
**Figura 2. 3 Definición de las piezas del troquel con punzón fijo. Fuente [34]**



**Figura 2. 4 Proceso de troquelado por corte fino. Fuente [34]**

## 2.4 Prensas

Las prensas que se usan para el trabajo de láminas metálicas son máquinas herramienta que tienen una cama estacionaria y un pistón (o corredera), como se muestra en la figura 2.5, el cual puede ser accionado hacia la cama y en dirección contraria para ejecutar varias operaciones de corte y formado. Las posiciones relativas de la cama y el pistón se establecen por el armazón, el pistón es accionado mediante fuerza mecánica, neumática o hidráulica. Cuando se monta un dado en la prensa, el porta punzón se fija al pistón y el porta matriz se fija a la placa transversal de la cama de la prensa.



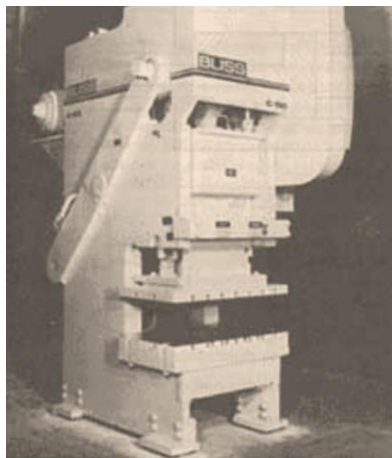
**Figura 2. 5 Componentes de una prensa con transmisión mecánica. Fuente [36]**

Hay prensas de varias capacidades, sistemas de potencia y tipos de armazón. La capacidad de una prensa es su disposición para manejar la fuerza y energía requerida para realizar las operaciones de troquelado. Ésta se determina por su tamaño físico y por sus sistemas de potencia. El sistema de potencia se refiere a la clase de fuerza que usa, ya sea mecánica o hidráulica, así como al tipo de transmisión empleada para enviar la potencia al pistón. La velocidad de producción es otro aspecto importante de la capacidad. El tipo de armazón de la prensa se refiere a la construcción física de la misma. Hay dos tipos de armazón o estructura de uso común: de escote o estructura en C y estructura de lados rectos.

Prensas de escote su estructura tiene la configuración general de la letra C y es frecuentemente llamada estructura o armazón en C. Las prensas de escote proporcionan buen acceso al dado, y generalmente pueden abrirse por la parte trasera para permitir la eyección conveniente de los troquelados o los sobrantes. Los tipos principales de prensas de escote son: a) Escote sólido, b) Cama ajustable, c) Inclinable con abertura posterior, d) Prensa plegadora y e) Prensa de torreta.

El escote sólido (algunas veces llamado simplemente prensa C) tiene una construcción de una sola pieza. Las prensas con esta estructura son rígidas, no obstante, la forma en C permite un acceso conveniente de los dados para alimentar tiras o rollos de material.

Dichas prensas representadas con la figura 2.6 están disponibles en una escala de tamaños con capacidades cercanas a las mil toneladas. Los moldes tienen una capacidad de 150 toneladas. Las prensas con armazón de cama ajustable son una variante de la estructura en C, en la cual una cama ajustable se añade para acomodar varios tamaños de dados. Este ajuste hace que se sacrifique la capacidad del tonelaje, La prensa inclinable con abertura posterior tiene una estructura en C ensamblada a la base, de tal manera que el armazón pueda inclinarse hacia atrás en varios ángulos para dejar caer, mediante la fuerza de gravedad, los troquelados por la abertura trasera. Las capacidades de tales prensas fluctúan entre 1 y 250 toneladas. Pueden operarse a altas velocidades hasta cerca de mil golpes por minuto [36].



**Figura 2. 6 Prensa de estructura en “C” de 50 toneladas. Fuente [36]**

### **2.5 Mantenimiento de troqueles**

La base principal para la duración de los troqueles es su adecuado uso y buen mantenimiento. El secreto para eliminar o reducir los posibles problemas a lo largo de la vida útil de las matrices, es tenerlos controlados e identificados.

Generalmente los fabricantes de troqueles garantizan las herramientas para la producción de un número de unidades determinado, no obstante, si el usuario respeta los parámetros del proceso y hace un riguroso mantenimiento con periodicidad, las matrices superan millones de veces las unidades garantizadas. Los ‘ajustadores’ entregan los planos de cada parte del troquel, piezas que, en caso de desgaste, deben

ser reemplazadas por un técnico autorizado, así mismo, cada matriz cuenta con especificaciones para lubricación y zonas y tiempos de mantenimiento.

Un tema de vital importancia y sumo cuidado es utilizar el troquel para el calibre de lámina que fue diseñado y nunca abusar en ese sentido, utilizándolos para diferentes espesores, pues esto es causa del desgaste prematuro, e incluso la ruptura de la herramienta. A su vez, los troqueles de corte deben ser rectificadas periódicamente, para lo cual es necesario conocer las tolerancias para el afilado, recomendadas por los fabricantes, pues no afilar la herramienta en las décimas o el periodo indicado es una de las causas principales de la disminución de su vida útil.

**Ensamble de punzón y matriz.** Los punzones y matrices con base superior e inferior son los más ampliamente usados porque son empleados para producir un tamaño promedio de piezas. La base para sujetar el punzón y la matriz a la tapa y base del dado está unida con tornillos y pernos respectivamente. Solo la parte final de corte o las áreas de contacto del punzón y matriz están endurecidas o cuenta con un material adherido con mayor dureza; la base es más suave para el adecuado montaje de los pernos al ensamblar. Se utiliza la prueba de error de uno de los pernos para asegurar el correcto ensamble cuando se le da mantenimiento.

**Sistema de guías.** El movimiento de las dos partes más importantes del troquel (bases superior e inferior) necesita ser guiado en todo momento para garantizar una total concentricidad entre ambas. Esta función se deja a cargo de los postes guía que van montados generalmente en la base inferior y sus respectivos bujes, sistema que se encarga de posicionar y centrar las dos partes del troquel. El sistema de postes guía puede ser de dos tipos: el más habitual es por rozamiento, el cual debe ser muy bien lubricado para no forzarlo, el segundo es de rodamientos o canastilla con una serie de elementos esféricos, en el que las columnas están acompañadas por una guía lineal de cilindros con esferas en su superficie, lo que facilita el desplazamiento, con excelentes ventajas, pues, el movimiento del sistema es muy ligero, los desgastes por rozamientos son bajos y necesita poca lubricación y mantenimiento.

## **2.6 Principales problemas de calidad en el troquelado**

La calidad de la superficie del corte depende en gran medida de la separación entre los dos filos de corte. Un factor muy importante debe ser considerado para las dimensiones del troquel: el correcto claro entre punzones y matrices. Para obtener piezas sin defectos de la tira metálica, debe haber exactamente el espacio correcto entre la orilla del punzón y la orilla de corte de la matriz. Si existen distancias pequeñas, las pérdidas en potencia serán excesivas para operar la prensa. También, cuando el punzón penetra la tira, las pequeñas fracturas que se originan por ambas partes, tanto del punzón como la matriz, no se unirán, y aparecerán bordes irregulares en la pieza cortada, o en el interior de un orificio punzonado.

La distancia excesiva en el claro estirará la pieza y producirá, largas y fibrosas rebabas alrededor de la orilla. La aplicación de un claro correcto resultará en una pieza libre de rebabas, y con la mayor extensión posible de la orilla pulida [37].

Las matrices con aperturas simétricas pueden ser ensambladas incorrectamente después de una reparación. Esto puede ocasionar defectos en los bordes cortados debido a la orientación incorrecta de punzón y matriz. Cuando se dimensiona, se debe colocar uno de los pernos de registro a diferente distancia que el otro, tomando como referencia el orificio de tornillo más cercano.

## **2.7 Herramientas para la mejora continúa**

A mediados del siglo XX, numerosas empresas en el mundo emprendieron la tarea de evaluar sus procesos internos y medir los efectos que tenían los productos en su entorno. Este tipo de medidas constituyeron lo que en la actualidad se conoce como procesos de mejora continua [38].

Seis Sigma es una de estas metodologías de mejora continua, fue lanzada a mediados de la década de 1980 por Motorola. Fue el resultado de una serie de cambios en el área de la calidad a partir de finales de los años setenta, con ambiciosos impulsos de mejora. La alta gerencia, junto con el CEO Robert Galvin formuló el objetivo de lograr la capacidad Seis Sigma en 1992 en un memo a todos los empleados de Motorola. A raíz de los éxitos de Motorola, otras empresas líderes en fabricación electrónica como IBM,

DEC, Texas Instruments, etc. lanzaron iniciativas Seis Sigma a principios de los años noventa. Sin embargo, no fue hasta 1995, cuando GE y Honeywell (anteriormente Allied Signal) lanzaron Seis Sigma como iniciativas estratégicas, que en una rápida difusión tuvo lugar en las industrias no electrónicas de todo el mundo [39].

El término Seis Sigma puede definirse de varias maneras. Algunas de las definiciones más prominentes de Seis Sigma incluyen lo siguiente:

Harry y Schroeder definieron Seis Sigma como una estrategia de negocio y una filosofía construida alrededor del concepto que las compañías pueden ganar una ventaja competitiva reduciendo defectos en sus procesos industriales y comerciales [40].

Pete Pande comentó que Seis Sigma es un sistema completo y flexible para lograr, mantener y maximizar el éxito empresarial. Es impulsado por la comprensión de las necesidades de los clientes y el uso disciplinado de los hechos, datos y análisis estadístico [41].

Seis Sigma es una estrategia de negocio que emplea herramientas estadísticas y no estadísticas de gestión del cambio, gestión de proyectos y trabajo en equipo y habilidades para maximizar el rol de una organización a través de la eliminación de defectos en los procesos.

### **2.7.1 Ventajas de SEIS SIGMA sobre otras iniciativas de mejora continúa**

Seis Sigma proporciona una base científica y estadística para la evaluación de la calidad de todos los procesos a través de la medición de los niveles de calidad.

Seis Sigma otorga una importancia sin precedentes a un liderazgo fuerte y visionario y al apoyo necesario para su implementación exitosa.

La estrategia de Seis Sigma pone un claro enfoque en lograr ahorros financieros mensurables y cuantificables para mejorar la línea de fondo de una organización.

La metodología Seis Sigma integra las herramientas y técnicas más potentes y bien establecidas de calidad y resolución de problemas de una manera disciplinada y sistemática.

Seis Sigma proporciona una infraestructura organizacional que muestra claramente roles y responsabilidades para las personas que están ejecutando proyectos y entregando resultados cuantificables a la línea inferior.

El diseño de experimentos es un tema que no se enseña adecuadamente a los estudiantes de ingeniería y de negocios de muchas universidades. Se ha demostrado que Seis Sigma es un catalizador para enseñar el DoE tanto a ingenieros como a directivos en organizaciones del hoy.

### **2.7.2 Aplicación seis sigma**

En cualquier programa Seis Sigma, se necesita un conocimiento exhaustivo del desempeño del proceso, metodología de mejora, herramientas estadísticas, procesos de las actividades del equipo del proyecto, implementación de las necesidades del cliente. Este conocimiento puede ser divulgado en toda la organización y convertirse en el conocimiento compartido de todos los empleados sólo a través de un esquema de entrenamiento adecuado. Muchas compañías que han introducido SEIS SIGMA han adoptado el siguiente sistema de rango de las cintas o cinturones de las artes marciales: Estas son las personas dentro de la organización que pueden hacer que SEIS SIGMA funcione.

**Yellow Belts:** Este es el nivel más bajo del sistema de cinturón y ofrece una introducción básica a SEIS SIGMA. El programa de capacitación de 2 días cubre los fundamentos de SEIS SIGMA, las métricas SEIS SIGMA, la metodología DMAIC, algunas de las herramientas básicas, el proceso de selección de proyectos y los factores críticos de éxito para el despliegue de SEIS SIGMA y generalmente se ofrece a las personas en la planta o al frente -línea de miembros del personal en una organización de servicio. Yellow Belts se espera completar un proyecto de mejora continua y demostrar un ahorro de al menos £ 2500 a la línea de fondo de la empresa. El proyecto debe implicar la aplicación de al menos dos herramientas básicas de SEIS SIGMA enseñadas en el curso de formación.

**Green Belts:** Los Cinturones Verdes cumplen los roles de los miembros del equipo de Mejoramiento de Procesos o Mejoramiento de la Calidad en los proyectos de cinturón

negro de tiempo completo. Un miembro del equipo de Green Belt puede venir de cualquier nivel dentro de una organización y proporcionar conocimientos de materia para un proyecto. Suele ser un curso de 1 a 2 semanas y generalmente se ofrece a los gerentes intermedios en una organización. SEIS SIGMA Green Belts se prepara en la metodología SEIS SIGMA DMAIC que les ayuda a las herramientas en cascada SEIS SIGMA y técnicas en toda una organización. SEIS SIGMA Green Belts se requiere para completar un proyecto de mejora continua basado en herramientas SEIS SIGMA y técnicas que demuestran un beneficio de aproximadamente £ 30 k para la organización del estudio de casos.

**Black Belts:** SEIS SIGMA Black Belts son líderes de equipo responsables de implementar proyectos de mejora de procesos dentro de una organización para aumentar los niveles de satisfacción del cliente y la productividad del negocio. Cinturones negros han completado típicamente 4 semanas de entrenamiento y han demostrado el dominio de la materia a través de la finalización de los proyectos. Están obligados a completar uno o dos proyectos basados en las herramientas y técnicas Seis Sigma y deben seguir la metodología DMAIC, demostrando un beneficio de aproximadamente £ 90 k a la línea de fondo del negocio. El curso de Cinturón Negro es avanzado y comprensivo y tiene como objetivo crear a tiempo completo líderes de mejora de procesos en el negocio. Un cinturón negro debe demostrar el liderazgo del equipo, comprender la dinámica del equipo y asignar los roles y responsabilidades de los miembros del equipo. Los candidatos del Cinturón Negro son seleccionados entre los mejores líderes jóvenes de cualquier organización.

**Master black Belts:** Los Cinturones Negros Maestros SEIS SIGMA (MBBs) son agentes de cambio que lideran proyectos Lean Seis Sigma a nivel empresarial. Sus esfuerzos incluyen el despliegue, la capacitación, el coaching, la tutoría y el apoyo técnico a Green Belts y Black Belts. Una MBB tiene calificaciones Black Belt y se selecciona de Black Belts que tienen una gran experiencia con las actividades del proyecto. SEIS SIGMA MBBs debe tener buena presentación y habilidades de liderazgo. Ellos monitorean constantemente el desempeño de SEIS SIGMA en su organización y aseguran que sus prácticas sean consistentemente seguidas por todos

los departamentos subyacentes en su verdadero sentido. En algunas organizaciones, MBB también tienen el papel de campeones. En otros, están más inclinados hacia los roles de coaching y ayudan a los campeones de la compañía que representan su jerarquía de alto nivel.

### 2.7.3 Metodología DMAIC

DMAIC, es una metodología desarrollada por Motorola a principios de los 90's, la primer letra "D" fue agregada por General Electric, la cual comprende una estrategia de 5 pasos estructurados de aplicaciones generales [27]. La figura 2.7 muestra los pasos de la metodología.

SEIS SIGMA consiste en la ejecución constante de proyectos de mejora siguiendo la metodología conocida como DMAIC.



Figura 2. 7 Metodología DMAIC. Fuente [42]

#### Definir: ¿Qué es lo importante?

- Define los objetivos del proyecto.
- Define los requerimientos críticos para el cliente
- Documenta el proceso (Crea un mapeo del mismo).
- Crea la definición más fácil de entender de dicho problema.
- Construye al equipo efectivo.

#### Medir: ¿Cómo lo estamos haciendo ahora?

- Mide el desempeño actual del proceso.
- Determina el ¿Qué? Voy a medir.
- Desarrolla y valida el sistema de medición.
- Determina el desempeño actual del proceso.

### **Analizar: ¿Qué está mal?**

- Analiza y determina la causa raíz de los problemas y o defectos.
- Entiende la razón para la variación e identifica las causas potenciales.
- Identifica las oportunidades de mejora en el proceso.
- Desarrolla y prueba las hipótesis para la causa raíz de las soluciones.

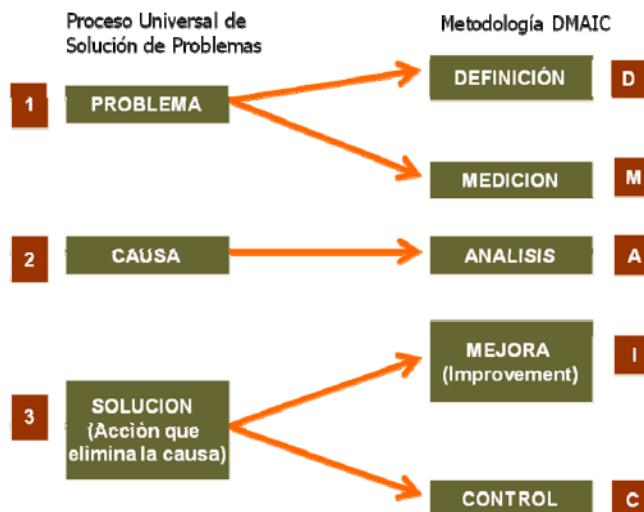
### **Mejora: ¿Qué necesito hacer?**

- Desarrolla y cuantifica las soluciones potenciales.
- Mejora/Optimiza el proceso.
- Evalúa/Selecciona la solución final.
- Verifica la solución final.
- Gana la aprobación de la solución final.

### **Controla: ¿Cómo garantizo el desempeño?**

- Implementa la solución.
- Garantiza que la mejora es mantenida.
- Asegúrate que los nuevos problemas son identificados rápidamente.
- Digitaliza siempre que sea posible.
- Estandarice: Copie el concepto – ¿Donde?

La figura 2.8 muestra una aplicación genérica de la solución de problemas con la metodología DMAIC.



**Figura 2. 8 DMAIC sigue el proceso universal de solución de problemas. Fuente [42]**

#### 2.7.4 DoE alineado al modelo de mejora DMAIC

Se seguirán las cinco etapas del modelo, integrando a las etapas de Análisis e Implementación de la mejora, la herramienta de Diseño de Experimentos. Durante la fase de definición se identificarán las métricas de rendimiento de proceso que ayuden a cuantificar el impacto de las mejoras de proceso en términos objetivos y se definirán metas de rendimiento como resultado de las actividades de mejora.

En la fase de medición se identificarán las variables de proceso y métodos de medición considerando criterios de repetitividad y reproducibilidad para determinar si el estado de la medición es adecuado para el proceso. Se analizará la relación de entradas y salidas del proceso, utilizando diferentes herramientas como el Análisis de Modos de Fallas y efectos, matriz causa efecto, Diagrama de Ishikawa y Diseño de Experimentos entre otras, así como determinar los niveles óptimos de operación de cada entrada crítica del proceso.

Se trabajará en implantar mejoras al proceso mediante la documentación de proceso, instrucciones de trabajo, procedimientos de operación y manuales que sean requeridos,

En la fase de control, se identificarán los puntos de verificación de proceso (sensores), los medios de comparación de las variables seleccionadas y la toma de decisión o cambio requerido al proceso en caso de que el estado de la variable así lo requiera (control).

La metodología propuesta DMAIC-DoE desarrollada en el año 2015 por la Doctora Karla I. Velázquez aporta nuevos pasos al modelo mencionado en este apartado como lo son la fase de planeación y el pre-análisis experimental, lo que lo hace una herramienta muy poderosa para la optimización de los procesos productivos.

### **2.7.5 Diseño de experimentos – DoE**

Los modelos de diseño de experimentos son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia.

La metodología del diseño de experimentos se basa en la experimentación. Es sabido que si se repite un experimento, en condiciones indistinguibles, los resultados presentan una cierta variabilidad. Si la experimentación se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están muy controladas, el error experimental será pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento. Pero si se experimenta en procesos industriales o administrativos la variabilidad será mayor en la mayoría de los casos.

El objetivo del diseño de experimentos es estudiar si cuando se utiliza un determinado tratamiento se produce una mejora en el proceso o no. Para ello se debe experimentar aplicando el tratamiento y no aplicándolo. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación.

La metodología del diseño de experimentos estudia cómo variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta; de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés.

Para que la metodología de diseño de experimentos sea eficaz es fundamental que el experimento esté bien diseñado.

Un experimento se realiza por alguno de los siguientes motivos:

- Determinar las principales causas de variación en la respuesta.
- Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o respuesta.
- Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

La utilización de los modelos de diseño de experimentos se basa en la experimentación y en el análisis de los resultados que se obtienen en un experimento bien planificado. En muy pocas ocasiones es posible utilizar estos métodos a partir de datos disponibles o datos históricos, aunque también se puede aprender de los estudios realizados a partir de datos recogidos por observación, de forma aleatoria y no planificada [43].

Conceptos básicos de la terminología común utilizada en la teoría de los modelos de diseño de experimentos:

- **Unidad experimental:** Son los objetos, individuos, intervalos de espacio o tiempo sobre los que se experimenta.
- **Variable de interés o respuesta:** Es la variable que se desea estudiar y controlar su variabilidad.
- **Factor:** Son las variables independientes que pueden influir en la variabilidad de la variable de interés.
- **Factor tratamiento:** Es un factor del que interesa conocer su influencia en la respuesta.

- **Factor bloque:** Es un factor en el que no se está interesado en conocer su influencia en la respuesta pero se supone que ésta existe y se quiere controlar para disminuir la variabilidad residual.
- **Niveles:** Cada uno de los resultados de un factor. Según sean elegidos por el experimentador o elegidos al azar de una amplia población se denominan factores de efectos fijos o factores de efectos aleatorios.
- **Tratamiento:** Es una combinación específica de los niveles de los factores en estudio. Son, por tanto, las condiciones experimentales que se desean comparar en el experimento. En un diseño con un único factor son los distintos niveles del factor y en un diseño con varios factores son las distintas combinaciones de niveles de los factores.
- **Observación experimental:** Es cada medición de la variable respuesta.
- **Tamaño del Experimento:** Es el número total de observaciones recogidas en el diseño.
- **Interacción de factores:** Existe interacción entre dos factores ***FI*** y ***FJ*** si el efecto de algún nivel de ***FI*** cambia al cambiar de nivel en ***FJ***. Esta definición puede hacerse de forma simétrica y se puede generalizar a interacciones de orden tres o superior.
- **Ortogonalidad de factores:** Dos factores ***FI*** y ***FJ*** con ***I*** y ***J*** niveles, respectivamente, son ortogonales si en cada nivel ***i*** de ***FI*** el número de observaciones de los ***J*** niveles de ***FJ*** están en las mismas proporciones. Esta propiedad permite separar los efectos simples de los factores en estudio.
- **Diseño equilibrado o balanceado:** Es el diseño en el que todos los tratamientos son asignados a un número igual de unidades experimentales [43].

### 2.7.6 DoE y su papel dentro de SEIS SIGMA

Ya hemos visto que el DoE tiene un papel claro en la fase de mejora de la metodología SEIS SIGMA. Sin embargo, se ha observado que las aplicaciones de DoE han aumentado perceptiblemente. Los desarrollos en el despliegue del DoE con fines de calidad pueden verse en términos de metodologías "etiquetadas" que los profesionales

y gerentes de calidad han enfrentado en las últimas décadas. En un programa de Seis Sigma, DoE es muy útil en términos de verificación de las relaciones de causa y efecto entre el CTQ' s (*Criticas para la calidad*) y los factores críticos que impulsan el proceso en estudio. En SEIS SIGMA también se utilizan estudios multi-variables para identificar fuentes de variación debidas a variables de proceso cuyos efectos deben verificarse mediante la aplicación de DoE. SEIS SIGMA utiliza el pensamiento estadístico para integrar la gestión establecida y herramientas estadísticas en el enfoque DMAIC a la mejora de la calidad orientada al cliente.

El DoE se utiliza principalmente en la fase de mejora de DMAIC para evaluar el impacto de los parámetros clave del proceso que influyen en los CTQ (*Criticas para la calidad*). DoE también juega un papel crucial en el diseño de la metodología SEIS SIGMA. DFSS por sus siglas en inglés (*Design For Six Sigma*) utiliza una metodología diferente como Definir-Medir-Analizar-Diseñar-Optimizar-Verificar. DoE puede ser muy útil en las Fases Definir y Optimizar de la metodología anterior en términos de comprender los parámetros críticos del diseño que afectan el rendimiento de diseño de los productos / servicios. Además, hay que reducir el número de parámetros de diseño a un número manejable y las tolerancias deben establecerse en aquellas que se verifican como críticas para los clientes. Debido a las iniciativas de SEIS SIGMA en muchas organizaciones, el DoE ahora es aplicado por la alta dirección y ejecutado por ingenieros con entrenamiento Black Belt. Por otra parte, recientemente el DoE ha atraído la atención de muchos gerentes de alto nivel en las organizaciones de servicios en términos de una mejor comprensión de sus procesos de negocio básicos y cómo optimizarlos para reducir los problemas de los clientes y mejorar la experiencia del cliente [44].

## **2.8 Equipos de medición para análisis de la calidad del corte por troquelado**

Los instrumentos de medición son el medio por el que se hace esta conversión o medida. Dos características importantes de un instrumento de medida son la apreciación y la sensibilidad. Apreciación es la mínima cantidad que el instrumento puede medir (sin estimaciones) de una determinada magnitud y unidad, o sea es el intervalo entre dos divisiones sucesivas de su escala [45].

### 2.8.1 Inspección visual

La inspección visual se puede definir como el examen de un material, pieza o producto para evaluar su conformidad usando la vista, sola o con ayuda de alguna herramienta. Las posibilidades de detección de esta técnica se limitan, obviamente, a aquellos defectos que son visibles, tales como grietas, poros, desgaste, cavitación, decoloraciones, corrosión, entre otros.

La calidad de la inspección depende de cuatro factores:

- La calidad del detector (equipo de medición).
- Las condiciones de luminosidad.
- La capacidad de procesar los datos obtenidos.
- El nivel de entrenamiento y la atención a los detalles.

Para obtener buenos resultados, el inspector debe tener:

- Conocimientos básicos del procesamiento del producto
- Conocer las fases de diseño, aplicación y servicio.
- Instrucciones con criterios claros de aceptación y rechazo.

Aplicaciones comunes incluyen determinar tolerancias en componentes, dimensiones de piezas, alineamientos y deformaciones de materiales.

### 2.8.2 Equipo de medición

**El estéreo-microscopio** se emplea cuando se requiere una imagen en tres dimensiones. También se conocen como microscopios de disección. El objeto analizado se observa a través de dos lentes que enfocan dos posiciones diferentes de modo que cada ojo del usuario obtiene una imagen diferente muy nítida dando la percepción de profundidad. Este estéreo-microscopio es ideal para gemología, grabado de metales, museos, industria electrónica y de semiconductores, investigación. También se emplea en microbiología que requiere baja generación de calor [46].

#### **Principales características**

- ✓ Estéreo-microscopio triocular con magnificación de 3.5 – 90 X.
- ✓ Cabezal trino cular de 30 mm muy amplio.

- ✓ Distancia de trabajo de 200 mm
- ✓ Amplio campo de visión de 65 mm y amplia distancia de trabajo de 200 mm
- ✓ Brazo doble que permite girar el microscopio en tres ejes (X, Y y Z) para acercar el microscopio en cualquier dirección.
- ✓ Tiene un anillo de iluminación de 144 luces LED con atenuador para control de intensidad de luz. Iluminación uniforme y suave.
- ✓ Ocular digital con cámara de alta resolución de 10,7 mega píxeles para captura de imágenes y videos en la pantalla de su computadora.
- ✓ Software para procesamiento de imágenes y medición de longitud, ángulo, área y otros.

**Los micrómetros** son equipos para realizar medidas de precisión obteniendo lecturas directas en contacto con la pieza.

**Los calibradores** son muy utilizados para comprobar las dimensiones de piezas troqueladas, desgastes de elementos en servicio y holguras entre ellos.

**Sistema de medición de visión CNC** con funcionalidad avanzada para cumplir cualquier necesidad de medición con o sin contacto. El sistema de medición ofrece un amplio campo de visión con lentes amplificadores de objetivos que pueden intercambiarse para cumplir los retos de medición de características pequeñas a grandes. El lente amplificador de ocho pasos está diseñado para un rango de amplificación de 0.5X a 7X, manteniendo la calidad vívida de la imagen. El objetivo opcional 1X logra un rango de amplificación de 0.5X a 3.5X con una distancia de trabajo de 74 mm y la opción 2X puede lograr un rango de amplificación de 1X a 7X.

Estos equipos están disponibles con rangos de medición de 10" x 8" x 6" (250 mm x 200 mm x 150 mm) o 16" x 16" x 8" (400 mm x 400 mm x 200 mm), con o sin opción de medición con sonda de contacto. El software usa detección de bordes y reconocimiento de patrones para ubicar y orientar el sistema de coordenadas con mínima interacción inicial del operador, asegurando precisión y repetibilidad de los resultados de medición.

Otras características incluyen una etapa LED programable, luz coaxial y luz de anillo LED de cuatro cuadrantes, autoenfoco de alta velocidad, cámara USB a color de alta resolución y alta velocidad, óptica de amplificación de alta calidad con lentes intercambiables, software de visión y sonda de contacto con posibilidad de modernizar. [47]

## **2.9 Normatividad aplicable a la fabricación de componentes electrónicos**

La Organización Internacional de Estandarización (ISO, según la abreviación aceptada internacionalmente) tiene su oficina central en Ginebra, Suiza, está formada por una red de institutos nacionales de estandarización en 156 países, con un miembro en cada país. El objetivo de la ISO es llegar a un consenso con respecto a las soluciones que cumplan con las exigencias comerciales y sociales (tanto para los clientes como para los usuarios). Estas normas se cumplen de forma voluntaria ya que la ISO, siendo una entidad no gubernamental, no cuenta con la autoridad para exigir su cumplimiento.

Sin embargo, tal como ha ocurrido con los sistemas de administración de calidad adaptados a la norma ISO 9000, estas normas pueden convertirse en un requisito para que una empresa se mantenga en una posición competitiva dentro del mercado.

**La ISO 9001:2008** es la base del sistema de gestión de la calidad ya que es una norma internacional y que se centra en todos los elementos de administración de calidad con los que una empresa debe contar para tener un sistema efectivo que le permita administrar y mejorar la calidad de sus productos o servicios.

Los clientes se inclinan por los proveedores que cuentan con esta acreditación porque de este modo se aseguran de que la empresa seleccionada disponga de un buen sistema de gestión de calidad (SGC) [48].

**AS9100 (BS EN 9100)** es la única norma común para la gestión de calidad y riesgo en la industria aeroespacial. Las empresas aeroespaciales líderes en el mundo la usan y la soportan a través de toda sus cadenas de suministro. AS9100 puede ser utilizada por organizaciones en todo el sector aeroespacial, incluyendo compañías de diseño, fabricación mantenimiento y distribución. Si usted se certifica por la norma, puede confiar en que tiene un sistema de gestión de calidad eficiente en práctica. AS9100

puede también ser esencial para lograr su licencia comercial, haciéndola esencial ahora y en el futuro [49].

¿Cuáles son los beneficios de la Gestión de Calidad Aeroespacial AS9100?

- Reducir el riesgo de errores o fallas fatales en productos o servicios.
- Demostrar una gestión de calidad efectiva para lograr una licencia para comercializar
- Obtener una lista en la base de datos del Sistema de Proveedores de Información En Línea (OASIS, por sus siglas en inglés).
- Convertirse en un proveedor preferido y gane la confianza de las partes interesadas y los clientes.
- Mejorar continuamente y ganar oportunidades internacionales de crecimiento

**MIL-STD-981C.** Es una norma militar del departamento de defensa de los Estados Unidos, aplicable donde se desarrollan prácticas de manufactura de componentes electrónicos con aplicaciones espaciales. Esta norma es la base técnica para el diseño, fabricación y estándares de calidad de dispositivos electromagnéticos personalizados. La intención de esta norma es proporcionar requisitos uniformes para dispositivos que se utilizan en aplicaciones espaciales críticas y equipos de tierra esenciales para la misión. Esta norma también cubre los dispositivos en vuelo no crítico y soporte de tierra no esencial para la misión.

El alcance de esta norma establece los requisitos para un diseño aceptable, fabricación y criterios de control de calidad para la construcción electromagnética de los circuitos integrados para aplicaciones espaciales [50].

## Capítulo 3 Desarrollo de la Metodología.

### **3.1 Fases del desarrollo de la metodología propuesta**

La metodología propuesta que será aplicada fue diseñada en 2015 por la doctora Karla Isabel Velázquez e implementada en una empresa del ramo aeroespacial, donde los resultados obtenidos fueron satisfactorios. Martín Tanco y colaboradores con su investigación están convencidos sobre la importancia del uso del diseño de experimentos en la industria, lo que dio inicio al desarrollo de la misma.

Este nuevo modelo de una metodología DoE incluye las etapas del proceso DMAIC, pero a futuro se planteó en la metodología DMAIC-DoE no solo estas cinco etapas y la experimentación, sino también etapas tan importantes como la planeación. La figura 3.1 muestra con mayor claridad el modelo propuesto en esta investigación, con fines de optimizar el proceso de troquelado de los componentes electrónicos.

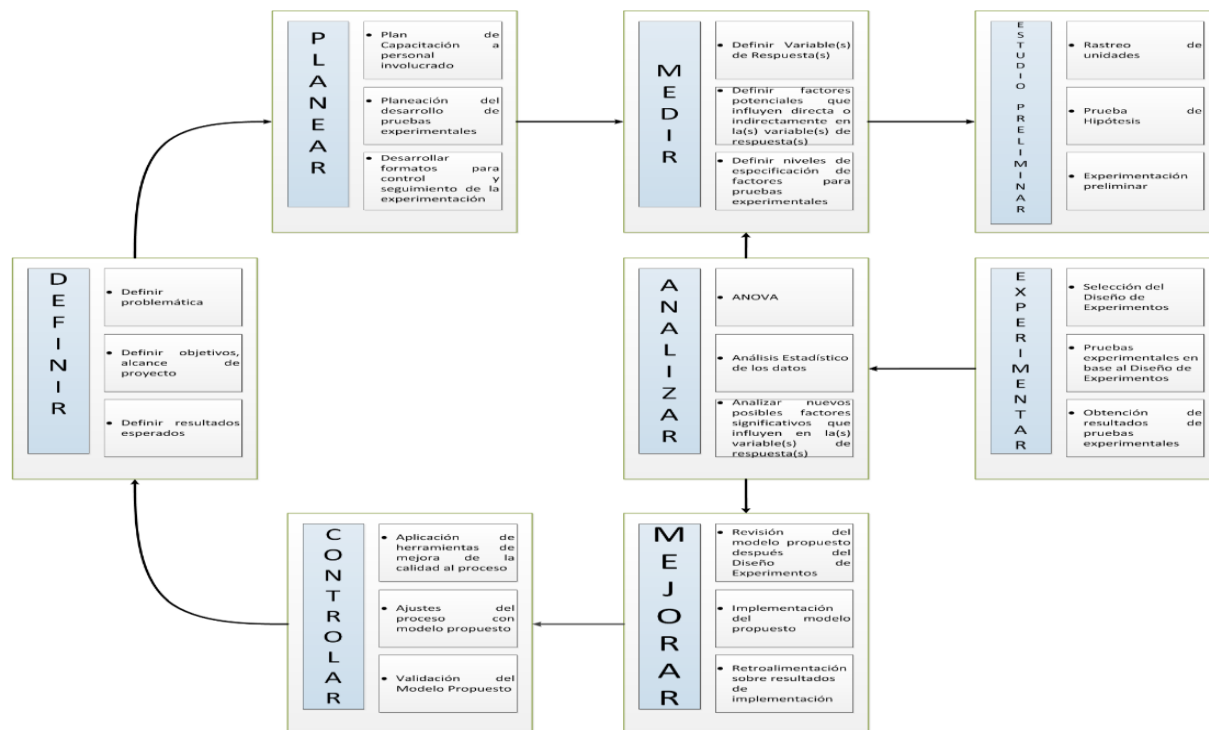


Figura 3. 1 Metodología propuesta DMAIC DoE. Fuente [51].

Luego de **Definir** el equipo, objetivos y alcance del proyecto, la metodología propone una etapa de **Planificación**, donde se realiza un plan de desarrollo de la metodología, elaboración de las hojas para control y seguimiento. Todo esto con la intención de realizar el proceso de **Medición** de la manera más ordenada, el **Estudio Preliminar**, la **Experimentación** y las siguientes etapas para poder **Analizar** los datos estadísticos y determinar si existen otros factores que están influyendo en la variable respuesta, haciendo posible la validación de la metodología y **Controlar** el proceso de troquelado de componentes electrónicos.

### 3.2 Generalidades del proceso de inductores

Los componentes electrónicos cuentan con una amplia gama de productos. En esta investigación nos concentraremos en los inductores. Un inductor es un componente electrónico pasivo que es capaz de almacenar energía eléctrica en forma de energía magnética. Básicamente, utiliza un conductor que se enrolla en una bobina, y cuando la

electricidad fluye en la bobina de izquierda a derecha, esto generará un campo magnético en el sentido de las agujas del reloj [52]. Los inductores tienen usos diversos, y una variedad de tipos de producto están disponibles según la aplicación [53]. La manufactura de estos componentes electrónicos es compleja y cuenta con muchos procesos como metalurgia de polvos, embobinado, moldeo, tratamientos térmicos, marcado con rayo láser y troquelado, por mencionar algunos, además de una variedad de pruebas tales como pruebas de jalón, pruebas eléctricas, de ambientes espaciales (temperatura, vibración, etc.) rayos X, entre otros.

### 3.3 Características y requerimientos del producto

En la empresa electrónica Vanguard se desarrollan una gran variedad de inductores desde usos comerciales hasta aplicaciones militares espaciales. Las características principales del objeto de estudio se muestran en la tabla 3-1 y la figura 3.2 respectivamente.

**Tabla 3- 1 Características del inductor de la serie 34000.**

| <b>Grado de aplicación</b> | <b>Altura (pulgadas)</b> | <b>Rango de inductancia</b> | <b>Q Rango (frecuencia)</b> | <b>Ancho y largo (pulgadas)</b> |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Alta fiabilidad            | 0.13                     | .010 hasta 10000 $\mu$ H    | 75 to 125                   | .155 x .125                     |

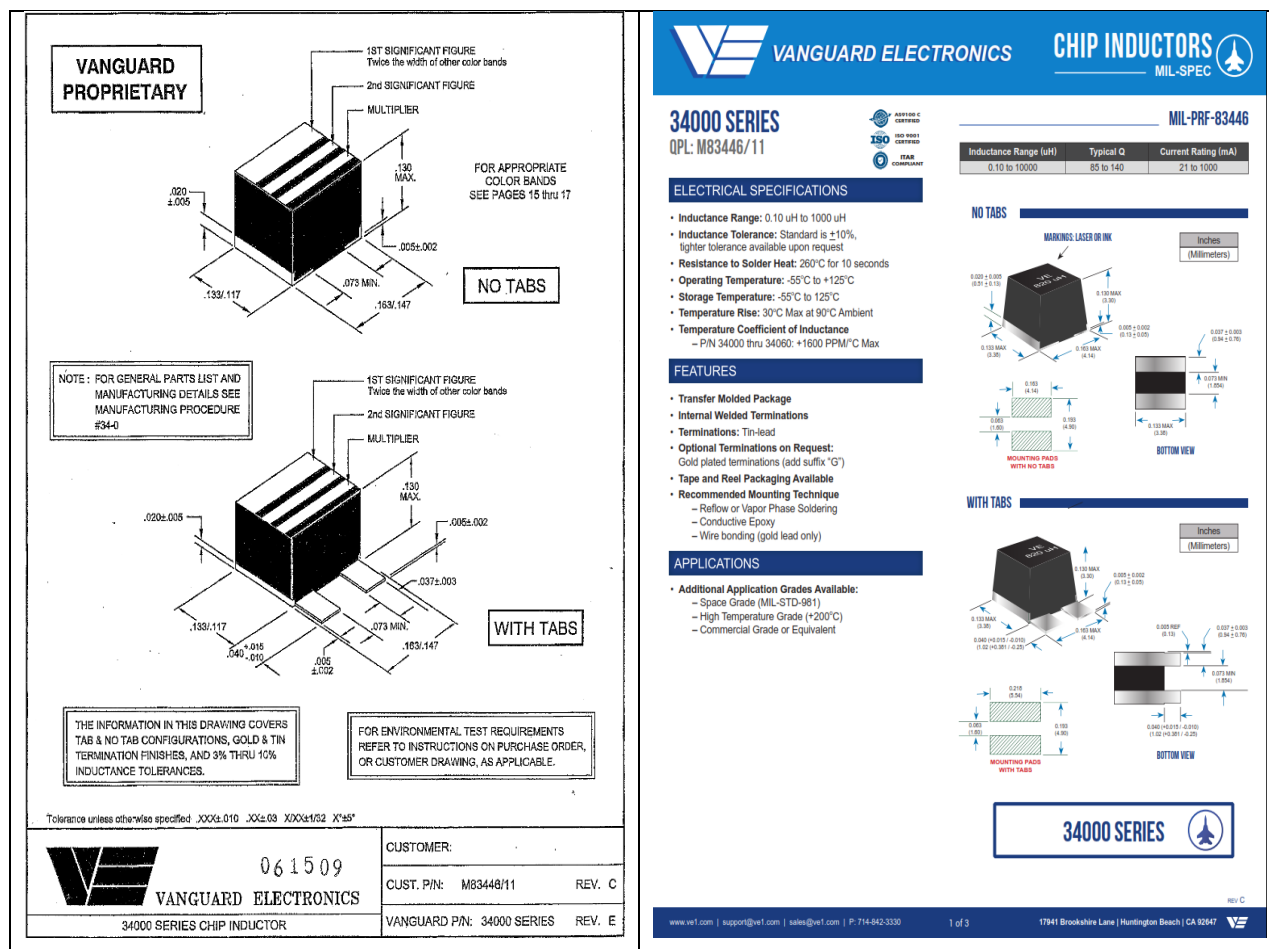


Figura 3. 2 Datos técnicos proporcionado por Vanguard Electronics [54].

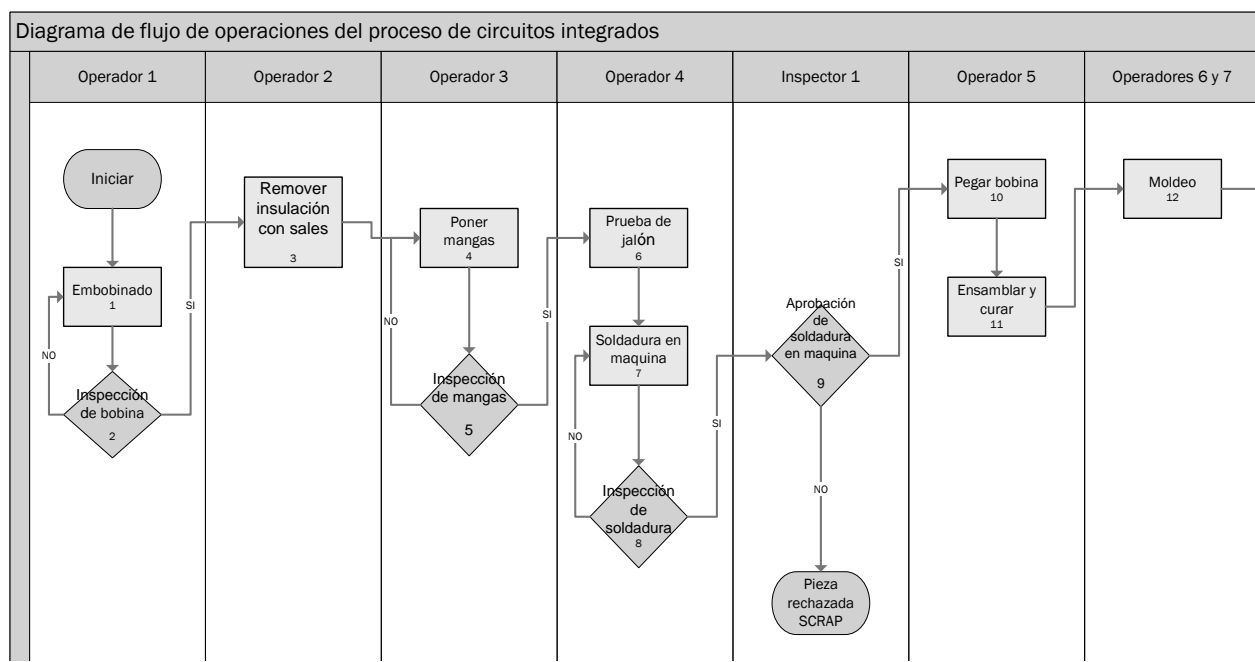
### 3.3.1 Revisión del proceso de manufactura de inductores de la serie 34000

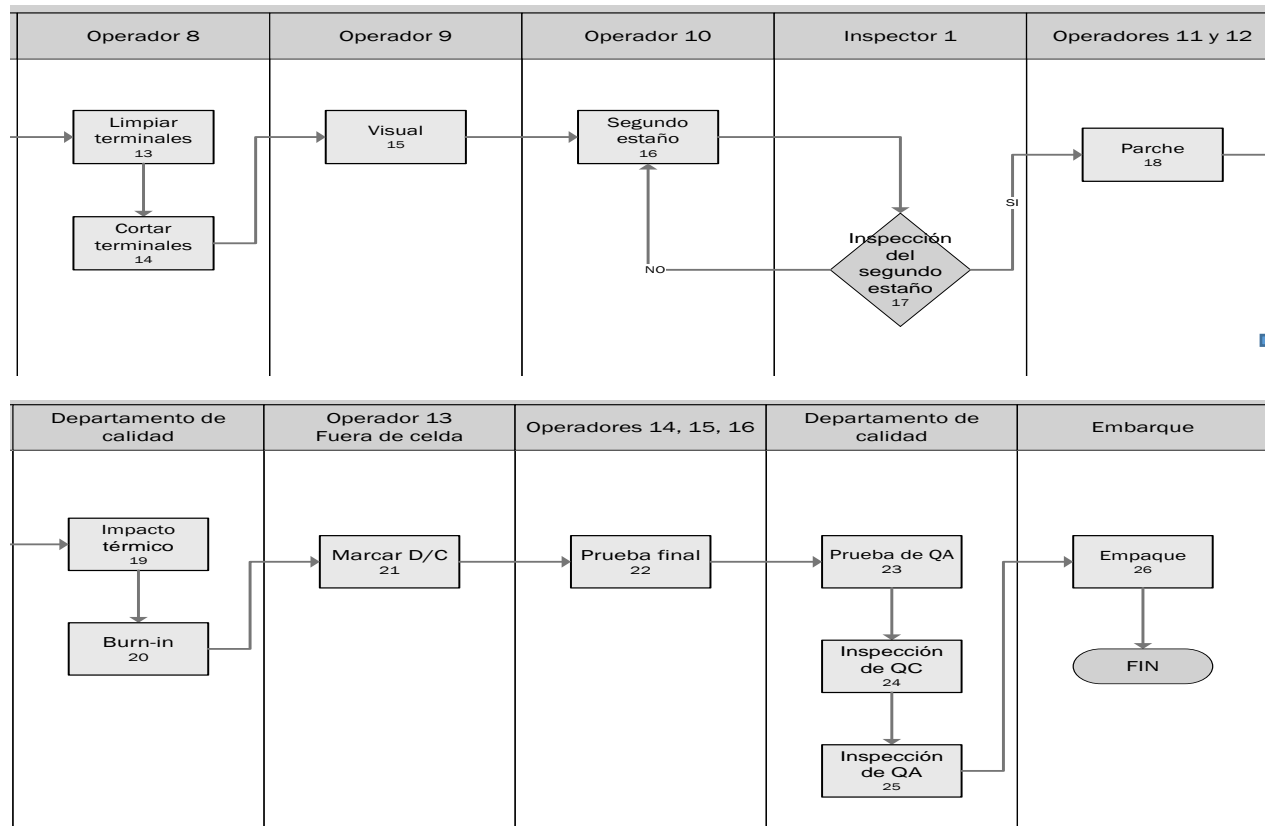
El conocimiento sobre los procesos es una tarea esencial en toda organización, puesto que ayuda a la misma a visualizar la estructura de procesos que posee o que quieren implantar, así como poder normalizar dichos procesos. Por su parte el Mapeo de Procesos, es una herramienta a disposición de las organizaciones mediante la cual les permite optimizar los procesos presentes en las mismas, o bien, en caso de aún no haber definido ninguno, ayuda a la implementación en la organización de una estructura basada en procesos.

Definir y mapear procesos es tremendamente útil para toda organización, pues es una manera de poder visualizar las fortalezas y debilidades que posee su estructura [55].

Para la elaboración del diagrama de flujo del proceso se integró al personal operativo de las celdas de chips, que son los encargados de manufacturar los inductores, los

cuales nos permitieron la obtención de la información, así como la observación exhaustiva del proceso. Esta información se registra de manera ordenada en un formato previamente elaborado (ver figura 3.3) en el cual se registraron las actividades de cada operario. Con esta información fue posible no solo la elaboración del diagrama de flujo del proceso, sino también diagramas de sub procesos, actividades de mayor interés o de mayor relevancia para la investigación. Una herramienta importante en estos subprocesos sería la utilización de un diagrama de flujo de alto nivel (SIPOC). El SIPOC es un diagrama de flujo a alto nivel y, a su vez, es el primer paso para la realización de un diagrama de flujo detallado. Permite visualizar los pasos secuenciales de un proceso definiendo claramente sus entradas, salidas, proveedores y clientes. Recoge detalles importantes sobre el inicio y el final del proceso. Es una herramienta de gran utilidad para identificar el proceso a investigar en la primera etapa de la metodología. Sus principales virtudes nos permite tener un conocimiento consistente del proceso analizado, ya que se consensua por el equipo del proyecto de mejora [56].





**Figura 3. 3 Diagrama de flujo de la manufactura de inductores**

### 3.4 Planeación del proceso del trabajo metodológico

La siguiente fase representa una nueva propuesta adaptada a la investigación; la fase de **Planeación**, la cual consistió en definir un plan de capacitación a todo el personal involucrado, con la finalidad de dar a conocer los objetivos y alcance del proyecto, así como las herramientas y metodologías que se estarían utilizando durante todo el desarrollo experimental. Como todo nuevo proyecto en ocasiones existe la resistencia al cambio, a participar, sin embargo, logrando permear correctamente la información, objetivos y alcance del proyecto, se pueden obtener mejores resultados y una integración del personal al proyecto más adecuada. Esto se implementó a través de varias capacitaciones del personal, abordando temas relacionados con el proyecto, como son la problemática, objetivos, metodología, instrumentos de control y resultados esperados. Es importante permitir al personal que exprese sus ideas y dudas acerca

del proyecto, de ahí que con una adecuada retroalimentación se asegura también una buena participación e involucramiento. En esta fase se inicia con la recolección de los datos (se recomienda utilizar hojas de verificación para recolectar la información de una manera clara y ordenada) para pruebas preliminares que nos den información sobre algunos hallazgos del proceso. Como parte de la Planeación, cada etapa ha sido adecuada a las necesidades del proceso, donde será necesaria la aplicación de herramientas para la realización de cada actividad, como resumen del desarrollo de las actividades se muestra la tabla 3-2 que a continuación se muestra.

**Tabla 3- 2 Resumen de la metodología propuesta**

| <b>Actividades para la aplicación de la metodología propuesta DMAIC- DoE</b> |                    |  |
|--|--------------------|--|
| <b>ETAPA</b>   | <b>ACTIVIDADES</b> | <b>DESARROLLO DE ACTIVIDADES</b>   |
| <b>Definir</b>   | Seleccionar equipo | Ing. Alfredo Escobar, tesista; Dra. Karla Isabel Velázquez, directora de tesis; Dr. Juan Carlos Ling, codirector; Ing. David Lerma, gerente de la empresa<br>Lorena Feliz, Supervisora del área de chips; Javier Aguilera, operador de troquelado; Charis Solano, inspectora de calidad; Virginia Carlon, inspección visual; Leticia Varajas, inspección visual. |
|  | Formular problema  | Hacer una investigación para saber que esta afectando el indicador de piezas defectuosas y como este impacta en la calidad del producto.   |
|  | Estado relevante   | Actualmente el proceso corte por troquelado cuenta con áreas de oportunidad en el plano de calidad. En algunos números de parte se tiene hasta el 100% de producto defectuoso.   |
|  | Fijar objetivo     | Optimización del proceso, por medio de la aplicación de la metodología propuesta DMAIC-DoE.  |

|                |                                       |   |
|----------------|---------------------------------------|---|
| <b>Planear</b> | Plan de capacitación                  | Establecer un programa de capacitación para el personal involucrado en el proyecto de implementación de la metodología DMAIC-DoE                          |
|                | Plan de pruebas experimentales        | Realizar un plan para el desarrollo de pruebas experimentales donde se puedan recaudar de forma contundente los datos obtenidos.                          |
|                | Plan de escenarios de experimentación | Determinar las condiciones bajo la cual se realiza la experimentación.  |
|                | Instrumentos de control               | Establecer instrumentos de medición los cuales nos aseguren que se lleven a cabo las pruebas experimentales bajo las mismas condiciones.                  |
| <b>Medir</b>   | Elegir respuesta                      | Piezas que cumplan con el requerimiento del cliente en cuanto las características del componente electrónico. Sin defectos apegado a plano de ingeniería. |
|                | Clasificar factores                   | Revisar el estado actual del proceso, hacer una clasificación de factores de entrada y salida   |
|                | Validar sistema de medición           | Estudio de medición de repetibilidad y reproducibilidad.  |
|                | Estado conocimiento del proceso       | Obtener resultados estadísticos que describan de manera clara la problemática actual.   |

|                           |  |   |
|---------------------------|--|---|
| <b>Estudio preliminar</b> | Caracterizar los factores                      | Con el objetivo de justificar la designación de factores asociados a la variable de respuesta se recomienda rastreo y recopilación de información relacionada con el proceso de troquelado.<br>Hacer una lista de las características de los factores, para hacer una correcta elección de los factores a analizar. |
|                           | Definir características necesarias para diseño | Una vez que se definan que factores se analizarán nos será posible definir las características del diseño.  |
|                           | Elegir diseño experimental                     | En base al estudio preliminar se proponen diseños para la experimentación más factibles al problema a tratar.   |
|                           | Seleccionar niveles                            | Utilizar herramientas de seis sigma para identificar factores y sus posibles niveles.   |
| <b>Experimentar</b>       | Bosquejo del experimento                       | Organizar como se va a realizar la experimentación. Con la ayuda del software Minitab para el diseño de las corridas del experimento. Parte fundamental ya que sustenta el análisis estadístico de los datos y ayuda a la toma de decisiones para la mejora del proceso.  |
|                           | Evaluar pruebas                                | Ya que se tiene definida la etapa de experimentación a utilizar se llevan a cabo las pruebas.   |
|                           | Realizar experimento y recolectar datos        | El registro de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales debe realizarse de manera precisa y con el apoyo del personal responsable y asignado a dichas pruebas, asegurándose que se lleve a cabo bajo las mismas condiciones.  |
|                           | Determinar el efecto de los factores           | Utilizar herramienta Minitab para procesar las pruebas experimentales y analizar la información obtenida, como el análisis de la varianza y gráficas de Pareto para conocer los factores estadísticamente significativos.   |

|                  |  |  |
|------------------|--|--|
| <b>Analizar</b>  | Posibilidad de construir un nuevo modelo | Realizar un informe con los resultados obtenidos y de ser necesario incluir o eliminar factores para nuevas experimentaciones.   |
|                  | Evaluar nuevos experimentos              | Hacer una propuesta y revisar si es posible evaluarla.   |
| <b>Mejorar</b>   | Optimización                             | Con los datos obtenidos, la interpretación correcta de las gráficas podemos llegar a condiciones óptimas del proceso de troquelado.  |
|                  | Conclusiones y recomendaciones           | Es importante la comunicación con el equipo de trabajo en el proceso de troquelado por lo que se recomienda tener una reunión de cierre para mostrar los resultados obtenidos, hallazgos encontrados, aprendizajes, conclusiones y recomendaciones del proyecto. Así como con la gerencia de la empresa sobre la optimización del proceso. |
| <b>Controlar</b> | Implementar nuevas condiciones           | Implementar actividades que conduzcan al control del proceso   |
|                  | Implementar controles                    | Implementar un plan para someter en control las actividades propuestas. Se recomienda utilizar herramientas de calidad que aseguren el adecuado seguimiento.   |
|                  | Validar resultados                       | Definir un lapso de tiempo para validar la efectividad del plan de control.<br>Realizar corridas piloto considerando los niveles sugeridos para cada uno de los factores significativos que dieron como resultado en la fase de experimentación.   |

Lo anterior para facilitar la comprensión de las actividades a desarrollar durante el proyecto de optimización en el proceso de troquelado, desde su concepción, e implementación y control. Con el objetivo de que pueda replicarse en investigaciones futuras.

### 3.5 Fase de Medición

Esta fase es importante para definir el estado actual del proceso, grado en el que un problema afecta la variable respuesta, para seguidamente analizar posibles soluciones, además de validar el sistema de medición empleado en el proceso.

#### 3.5.1 Conocimiento sobre el estado actual de fabricación de inductores

En una hoja de Excel se recopilieron los datos que se consideraron relevantes, los registros capturados se muestran en la siguiente tabla:

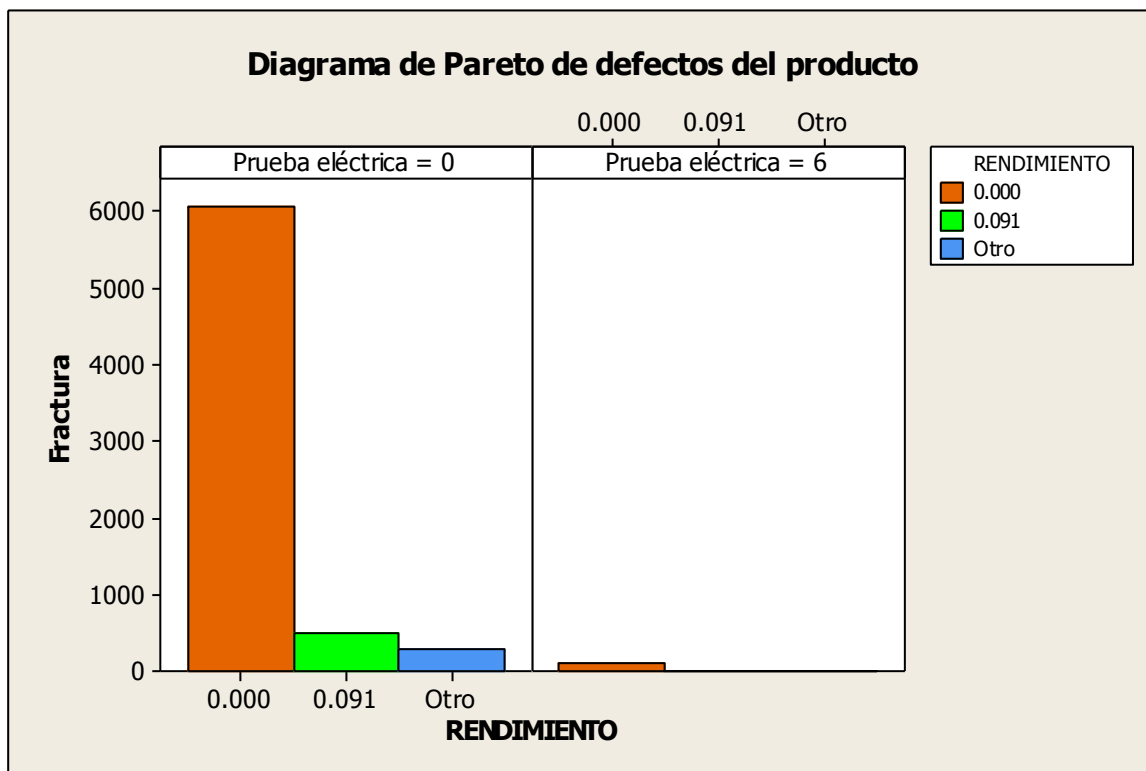
**Tabla 3- 3 Defectos relevantes en el producto de inductores**

| Numero de parte | Cant. Producción | Fractura | Prueba electrica | Impacto termico | Rebasas | YIELD       |
|-----------------|------------------|----------|------------------|-----------------|---------|-------------|
| 34000 series    | 70               | 70       | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 130              | 130      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 30               | 30       | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 300              | 300      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 550              | 550      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 600              | 600      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34666 series    | 100              | 94       | 6                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 500              | 500      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 120              | 120      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 600              | 300      | 0                | 0               | 0       | 0.5         |
| 34000 series    | 600              | 600      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 500              | 500      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 500              | 500      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 550              | 550      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 500              | 500      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 550              | 500      | 0                | 0               | 0       | 0.090909091 |
| 34000 series    | 550              | 0        | 0                | 0               | 0       | 100         |
| 34000 series    | 300              | 300      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 10               | 10       | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 200              | 200      | 0                | 0               | 0       | 0           |
| 34000 series    | 600              | 600      | 0                | 0               | 0       | 0           |

Con los datos obtenidos por la empresa, se construyó un diagrama de Pareto. El Diagrama de Pareto constituye un sencillo y gráfico método de análisis que permite discriminar entre las causas más importantes de un problema (los pocos y vitales), y las que lo son menos (los muchos y triviales). Las ventajas del Diagrama de Pareto pueden resumirse en:

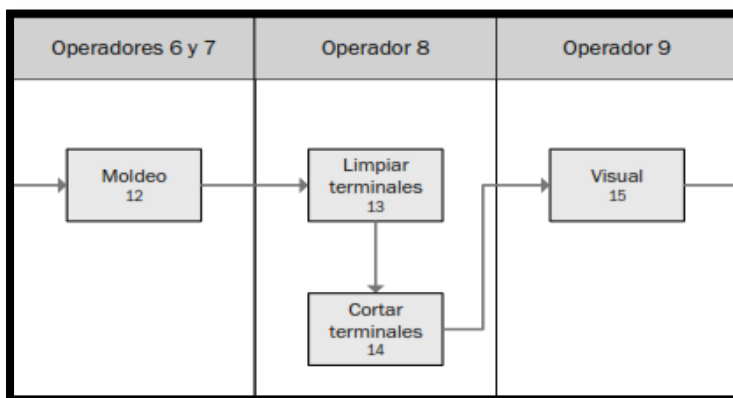
- Permite centrarse en los aspectos cuya mejora tendrá más impacto, optimizando por tanto los esfuerzos.
- Proporciona una visión simple y rápida de la importancia relativa de los problemas.

- Su visión grafica del análisis es fácil de comprender y estimula al equipo para continuar con la mejora [57].



**Gráfica 3. 1 Pareto de defectos del producto**

Con los resultados tan contundentes sobre la problemática en el troquelado, y con su principal defecto (fractura), representado en la gráfica 3.1 con la barra color naranja muestra que afecta la calidad del producto de los inductores, por lo tanto se pasa a una revisión más exhaustiva de dicho proceso. Ver figura 3.4

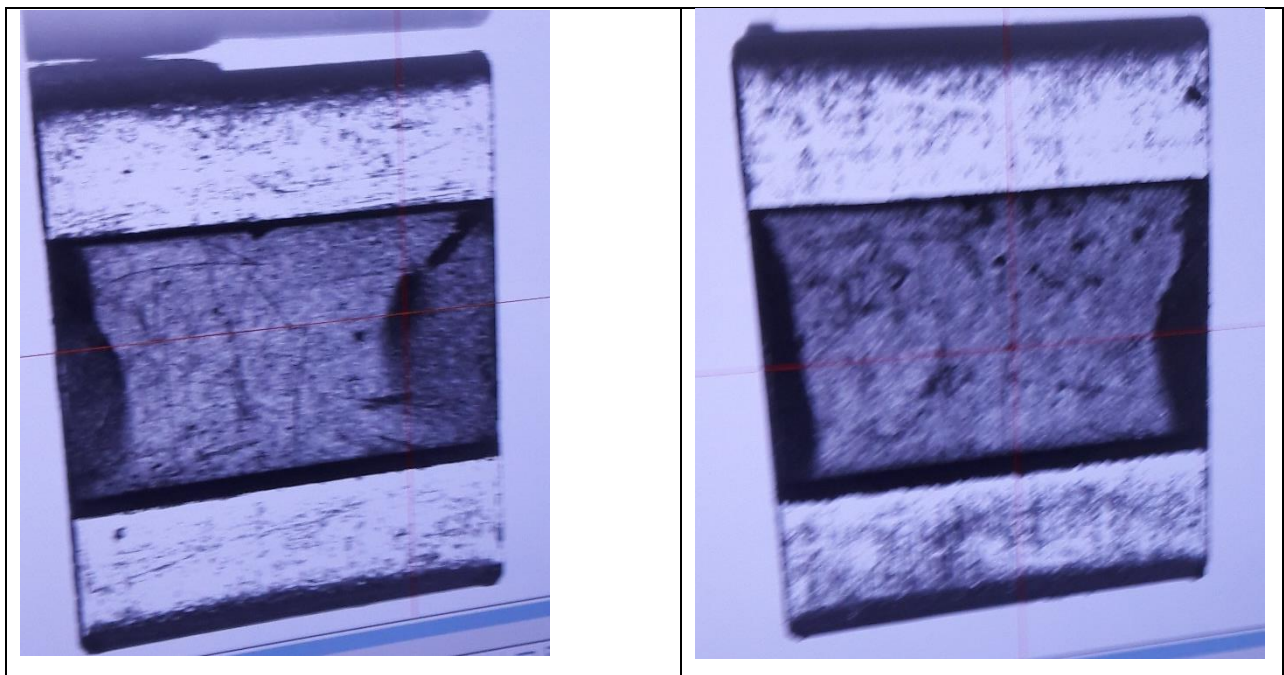


**Figura 3. 4 Procesos previos y posteriores al proceso de troquelado**

### 3.5.2 Selección de la variable de respuesta

La selección de la variable de respuesta se determinó mediante el análisis de los errores o defectos más recurrentes dentro del proceso de troquelado, donde se encontraron que fracturas y grietas en el plástico que encapsula al componente electrónico es la ocurrencia principal. Los inductores que son cortados continúan el proceso a las fases de inspección y prueba de desempeño, donde el problema principal de falla es la fractura que está directamente ligada a la dimensión del inductor, la medida de la fractura en el chip es la falla que más afecta la calidad del producto, además de generar otros problemas en el rendimiento productivo, así que es considerada como nuestra variable de respuesta.

Imagen del chip aumentado (ver figura 3.5) muestra con claridad las fracturas y grietas en el plástico.



**Figura 3. 5 Componente electrónico (inductor)**

### 3.5.3 Validación del sistema de medición

Un estudio R&R del sistema de medición le permite investigar:

- Si la variabilidad de su sistema de medición es pequeña en comparación con la variabilidad del proceso.

- Cuánta variabilidad en el sistema de medición es causada por diferencias entre operadores.
- Si su sistema de medición es capaz de distinguir entre partes diferentes.

Por ejemplo, varios operadores miden el diámetro de los tornillos para asegurarse de que cumplan las especificaciones. Un estudio R&R del sistema de medición indica si los inspectores son consistentes en sus mediciones de la misma parte (repetibilidad) y si la variación entre inspectores es consistente (reproducibilidad) [58].

Para realizar el siguiente estudio se tomó en cuenta al equipo involucrado en los procesos posteriores al corte, donde se inspecciona el producto y se determina si es aceptable o no. Enseguida se muestra al personal involucrado.

Operador A- Charis Solano

Operador B- Virginia Carlon

Operador C- Leticia Varajas

Se hicieron las mediciones con un micrómetro de manera aleatorizada como se muestra en la tabla 3-4.

La dimensión aceptable es de .117” a .133”

**Tabla 3- 4 Datos para el estudio de medición**

| CORRIDA | OPERADOR | PIEZA | MEDIDA  |
|---------|----------|-------|---------|
| 1       | A        | 1     | 0.13085 |
| 2       | A        | 1     | 0.13085 |
| 3       | A        | 1     | 0.1309  |
| 4       | A        | 2     | 0.13105 |
| 5       | A        | 2     | 0.131   |
| 6       | A        | 2     | 0.131   |
| 7       | A        | 3     | 0.13005 |
| 8       | A        | 3     | 0.13015 |
| 9       | A        | 3     | 0.13013 |
| 10      | A        | 4     | 0.13105 |
| 11      | A        | 4     | 0.131   |
| 12      | A        | 4     | 0.131   |
| 13      | A        | 5     | 0.13065 |
| 14      | A        | 5     | 0.13075 |

|    |   |   |         |
|----|---|---|---------|
| 15 | A | 5 | 0.1306  |
| 16 | B | 1 | 0.1307  |
| 17 | B | 1 | 0.1308  |
| 18 | B | 1 | 0.13085 |
| 19 | B | 2 | 0.1311  |
| 20 | B | 2 | 0.13105 |
| 21 | B | 2 | 0.13105 |
| 22 | B | 3 | 0.13011 |
| 23 | B | 3 | 0.13011 |
| 24 | B | 3 | 0.12999 |
| 25 | B | 4 | 0.131   |
| 26 | B | 4 | 0.13085 |
| 27 | B | 4 | 0.13085 |
| 28 | B | 5 | 0.1306  |
| 29 | B | 5 | 0.1307  |
| 30 | B | 5 | 0.1307  |
| 31 | C | 1 | 0.13085 |
| 32 | C | 1 | 0.13085 |
| 33 | C | 1 | 0.1308  |
| 34 | C | 2 | 0.13105 |
| 35 | C | 2 | 0.131   |
| 36 | C | 2 | 0.13095 |
| 37 | C | 3 | 0.13033 |
| 38 | C | 3 | 0.13033 |
| 39 | C | 3 | 0.1304  |
| 40 | C | 4 | 0.1311  |
| 41 | C | 4 | 0.1311  |
| 42 | C | 4 | 0.13105 |
| 43 | C | 5 | 0.1307  |
| 44 | C | 5 | 0.1305  |
| 45 | C | 5 | 0.1305  |

## Resultados:

### Tabla ANOVA de dos factores con interacción.

| Fuente           | GL | SC        | MC        | F       | P     |
|------------------|----|-----------|-----------|---------|-------|
| PIEZA            | 4  | 0.0000044 | 0.0000011 | 45.1057 | 0.000 |
| OPERADOR         | 2  | 0.0000000 | 0.0000000 | 0.7608  | 0.498 |
| PIEZA * OPERADOR | 8  | 0.0000002 | 0.0000000 | 6.9088  | 0.000 |
| Repetibilidad    | 30 | 0.0000001 | 0.0000000 |         |       |
| Total            | 44 | 0.0000047 |           |         |       |

Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25

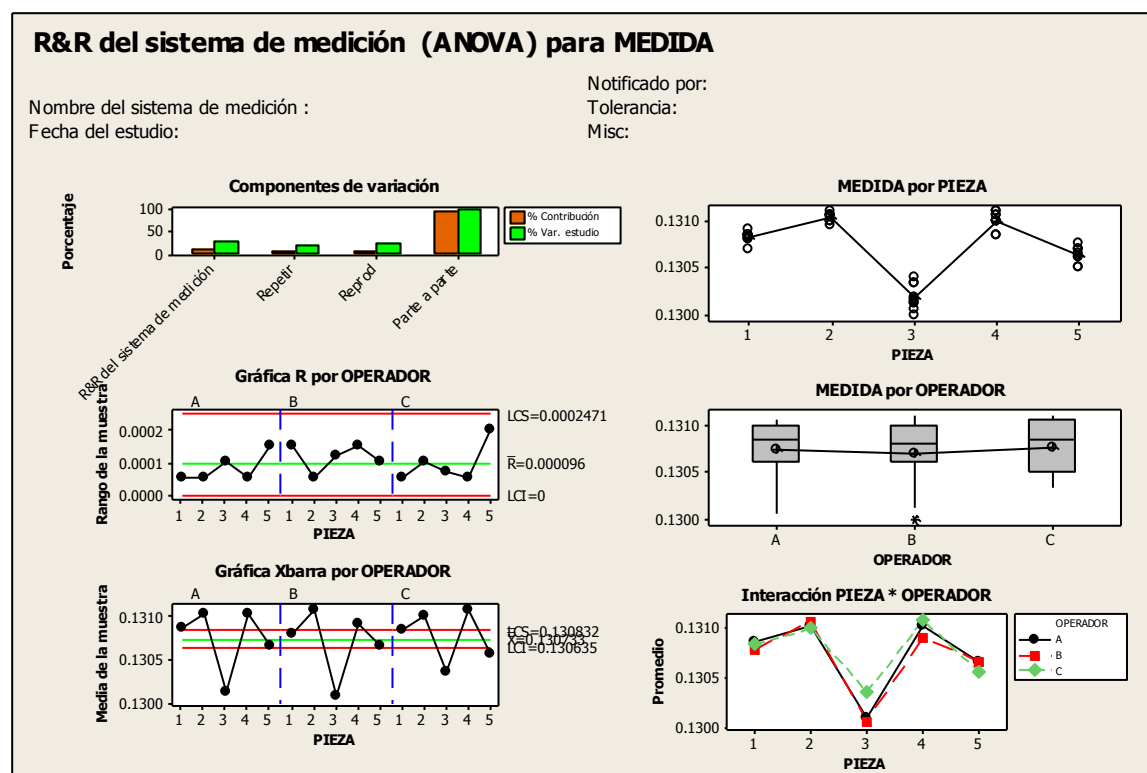
Si valor  $P < \alpha$  se rechaza  $H_0$   
R&R del sistema de medición.

| Fuente           | CompVar   | %Contribución<br>(de CompVar) |
|------------------|-----------|-------------------------------|
| Gage R&R total   | 0.0000000 | 8.06                          |
| Repetibilidad    | 0.0000000 | 2.72                          |
| Reproducibilidad | 0.0000000 | 5.35                          |
| OPERADOR         | 0.0000000 | 0.00                          |
| OPERADOR*PIEZA   | 0.0000000 | 5.35                          |
| Parte a parte    | 0.0000001 | 91.94                         |
| Variación total  | 0.0000001 | 100.0%Var.                    |

| Fuente           | Desv.Est.<br>(DE) | Var. Estudio<br>(6 * DE) | estudio<br>(%VE) |
|------------------|-------------------|--------------------------|------------------|
| Gage R&R total   | 0.0001020         | 0.0006121                | 28.40            |
| Repetibilidad    | 0.0000592         | 0.0003552                | 16.48            |
| Reproducibilidad | 0.0000831         | 0.0004985                | 23.13            |
| OPERADOR         | 0.0000000         | 0.0000000                | 0.00             |
| OPERADOR*PIEZA   | 0.0000831         | 0.0004985                | 23.13            |
| Parte a parte    | 0.0003445         | 0.0020668                | 95.88            |
| Variación total  | 0.0003592         | 0.0021555                | 100.00           |

**Variación del estudio por debajo del 30%; Por lo tanto se acepta el sistema de medición**



**Gráfica 3. 2 Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad.**

- La contribución de la variación debe ser menor del 30% para que sea aceptado
- La contribución está basado en la varianza.
- La gráfica Xbarra por operador debe tener por lo menos cuatro niveles para aceptar la resolución del instrumento.

Como conclusión del análisis de la varianza y de la gráfica 3.2 se considera aceptable este estudio de medición debido al porcentaje de variación del estudio que se encuentra por debajo del 30%, sin embargo podrían agregar esfuerzos en la reproducibilidad para reducir aún más la variación.

### 3.5.4 Medición del proceso de troquelado

Como parte de esta metodología propuesta, se tomaron datos sobre el estado de los inductores después de la operación de corte, y se encontró que el inductor presentaba fracturas en ambas aristas sobre la geometría de la pieza, específicamente en la altura de la pieza con tolerancia según plano de .117/.133 milésimas de pulgada. Los resultados se muestran en la siguiente tabla 3- 5.

**Tabla 3- 5 Datos del proceso de corte**

| <b>FRACTURA 1</b> | <b>FRACTURA 2</b> | <b>CHIP DIMENSIÓN</b> |
|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 0.009             | 0.0076            | 0.1287                |
| 0.0129            | 0.0066            | 0.1288                |
| 0.0113            | 0.0101            | 0.1291                |
| 0.0116            | 0.0086            | 0.1291                |
| 0.0134            | 0.0123            | 0.1291                |
| 0.0147            | 0.0113            | 0.1295                |
| 0.011             | 0.0123            | 0.1295                |
| 0.0118            | 0.0067            | 0.1295                |
| 0.013             | 0.015             | 0.1299                |
| 0.0078            | 0.0104            | 0.1299                |
| 0.0078            | 0.0112            | 0.13017               |
| 0.0106            | 0.0112            | 0.1302                |
| 0.007             | 0                 | 0.1303                |
| 0.0087            | 0.0027            | 0.1303                |
| 0.0124            | 0.0082            | 0.1303                |
| 0.0086            | 0.0091            | 0.1303                |
| 0.0182            | 0.0184            | 0.1304                |
| 0.0059            | 0.0073            | 0.1304                |
| 0.0113            | 0.0119            | 0.1305                |
| 0.015             | 0.0112            | 0.1305                |
| 0.0109            | 0.0089            | 0.1306                |
| 0.0131            | 0.0087            | 0.1306                |
| 0.0167            | 0.015             | 0.1307                |

|         |        |        |
|---------|--------|--------|
| 0.0027  | 0.0054 | 0.1307 |
| 0.014   | 0.0186 | 0.1307 |
| 0.0116  | 0.0022 | 0.1307 |
| 0.0064  | 0.0086 | 0.1308 |
| 0.008   | 0.0123 | 0.1308 |
| 0.0101  | 0.0134 | 0.1308 |
| 0.0132  | 0.0124 | 0.1308 |
| 0.0143  | 0.0149 | 0.131  |
| 0.01701 | 0.0172 | 0.131  |
| 0.0115  | 0.016  | 0.1311 |
| 0.012   | 0.0074 | 0.1311 |
| 0.009   | 0.0089 | 0.1311 |
| 0.0096  | 0.0096 | 0.1312 |
| 0.012   | 0.01   | 0.1312 |
| 0.0107  | 0.0272 | 0.1312 |
| 0.0088  | 0.0139 | 0.1312 |
| 0.009   | 0.014  | 0.1312 |
| 0.0129  | 0.0103 | 0.1315 |
| 0.0123  | 0.0159 | 0.1315 |
| 0.0114  | 0.0186 | 0.1316 |
| 0.0088  | 0.0089 | 0.1317 |
| 0.0121  | 0.0125 | 0.1319 |
| 0.015   | 0.0118 | 0.1322 |
| 0.0069  | 0.0109 | 0.1322 |
| 0.0126  | 0.0079 | 0.1323 |
| 0.0139  | 0.0153 | 0.1325 |
| 0.014   | 0.0125 | 0.1325 |

Con los resultados obtenidos se prosigue a procesarlos con la ayuda de un software, una herramienta muy poderosa para el análisis estadístico (Minitab). A continuación se muestran los resultados obtenidos:

### Estadísticas descriptivas: FRACTURA 1, FRACTURA 2, CHIP DIMENSIÓN.

| Variable   | N  | N* | Media    | Error                |           | Mínimo   | Q1       |
|------------|----|----|----------|----------------------|-----------|----------|----------|
|            |    |    |          | Estándar de la media | Desv.Est. |          |          |
| FRACTURA 1 | 50 | 0  | 0.011250 | 0.000430             | 0.003037  | 0.002700 | 0.008950 |
| FRACTURA 2 | 50 | 0  | 0.011226 | 0.000655             | 0.004629  | 0.000000 | 0.008600 |
| CHIP DIM   | 50 | 0  | 0.13070  | 0.000131             | 0.000930  | 0.12870  | 0.13028  |

| Variable   | Mediana  | Q3       | Máximo   |
|------------|----------|----------|----------|
| FRACTURA 1 | 0.011550 | 0.013125 | 0.018200 |
| FRACTURA 2 | 0.011200 | 0.013925 | 0.027200 |

CHIP DIM 0.13070 0.13120 0.13250

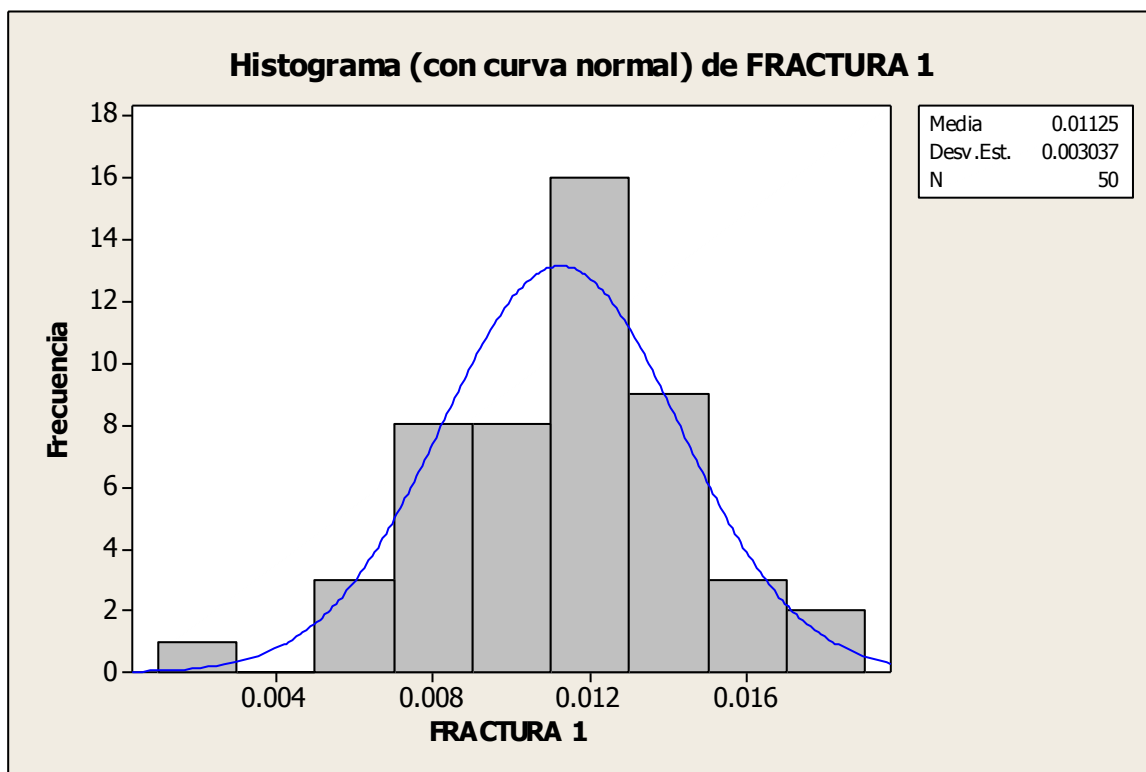
Como conclusión podemos asumir que existe suficiente evidencia estadística que indica que las fracturas en los inductores tienen mucha variación, además el valor  $p$  indica que las medias de las fracturas son diferentes.

El valor “P” es una medida de la fuerza de la evidencia en sus datos en contra de  $H_0$ . Por lo general, mientras más pequeño sea el valor  $p$ , más fuerte será la evidencia de la muestra para rechazar  $H_0$ . Más específicamente, el valor  $p$  es el menor valor de  $\alpha$  que conduce al rechazo de  $H_0$ . Para cualquier valor de  $\alpha > \text{valor } p$ , usted no puede rechazar  $H_0$ , y para cualquier valor de  $\alpha \leq \text{valor } p$ , usted rechaza  $H_0$ . [59].

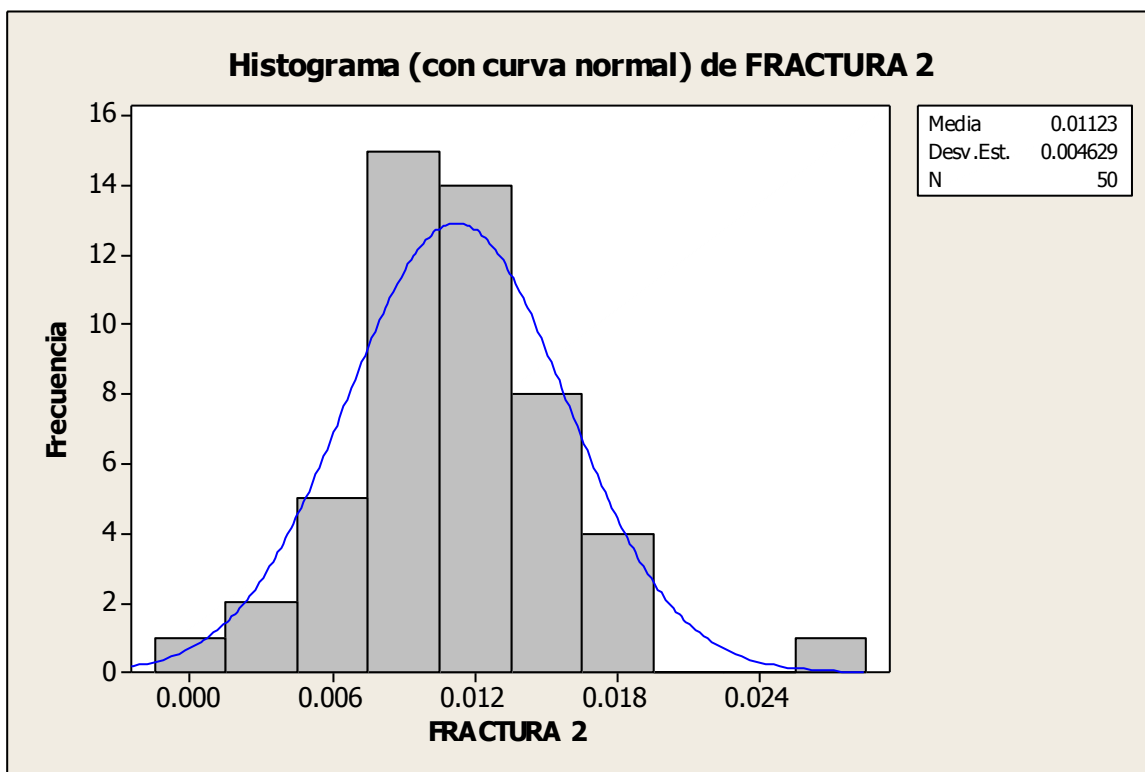
Para mostrarlo de manera más clara se realizó gráficas de histogramas con curva normal y gráfica de dispersión, mostradas en las gráficas 3.3, 3.4, y 3.5 respectivamente.

La mayoría de los datos que representan nuestros procesos se ajustan a una distribución normal. Cuando hacemos el histograma de nuestros datos, esperamos observar que esta distribución tenga una curva suave conocida como la campana de Gauss. Al igual en algunas ocasiones los histogramas presentan unas formas más peculiares [60].

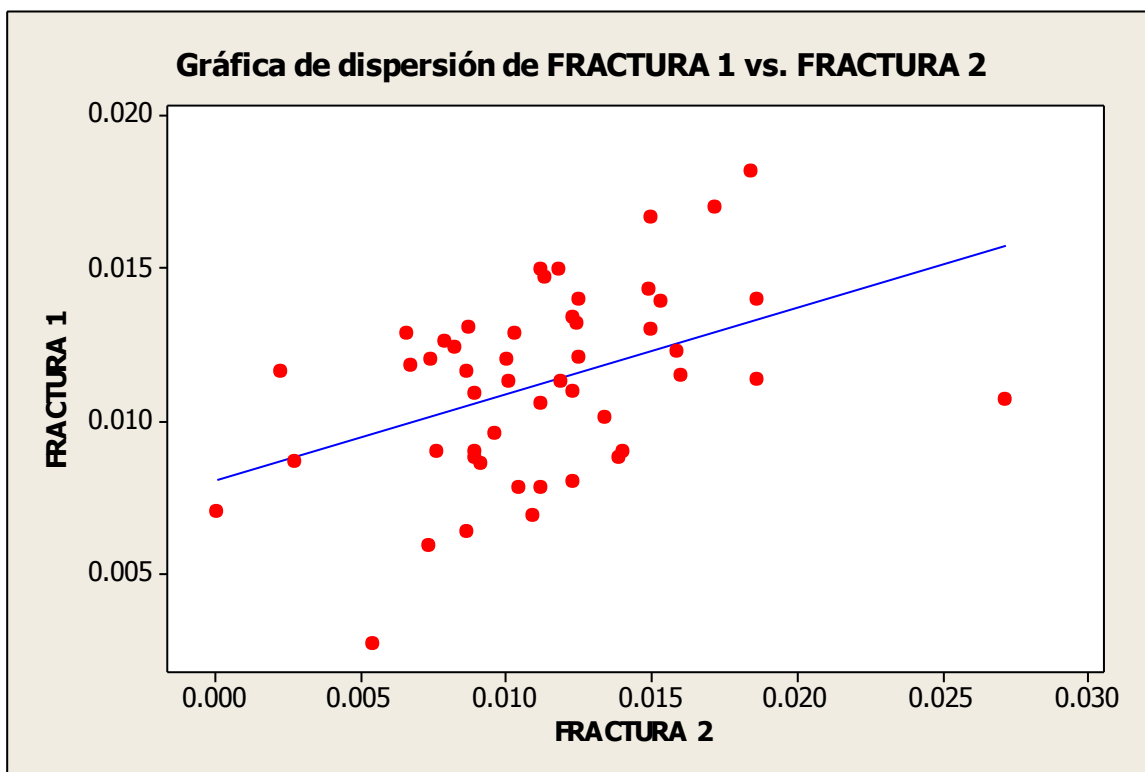
Una gráfica de dispersión es una gráfica que puede utilizar para explorar la relación potencial entre un par de variables continuas. Minitab grafica símbolos en los valores de datos de las variables en sus coordenadas (X, Y). Los patrones pueden revelar una relación entre las variables y ayudarle a determinar el siguiente paso de sus análisis de datos [61].



**Gráfica 3. 3 Histograma de fractura.**



**Gráfica 3. 4 Histograma de fractura.**



**Gráfica 3. 5** Dispersión entre las fracturas

### 3.6 Características del Estudio Preliminar

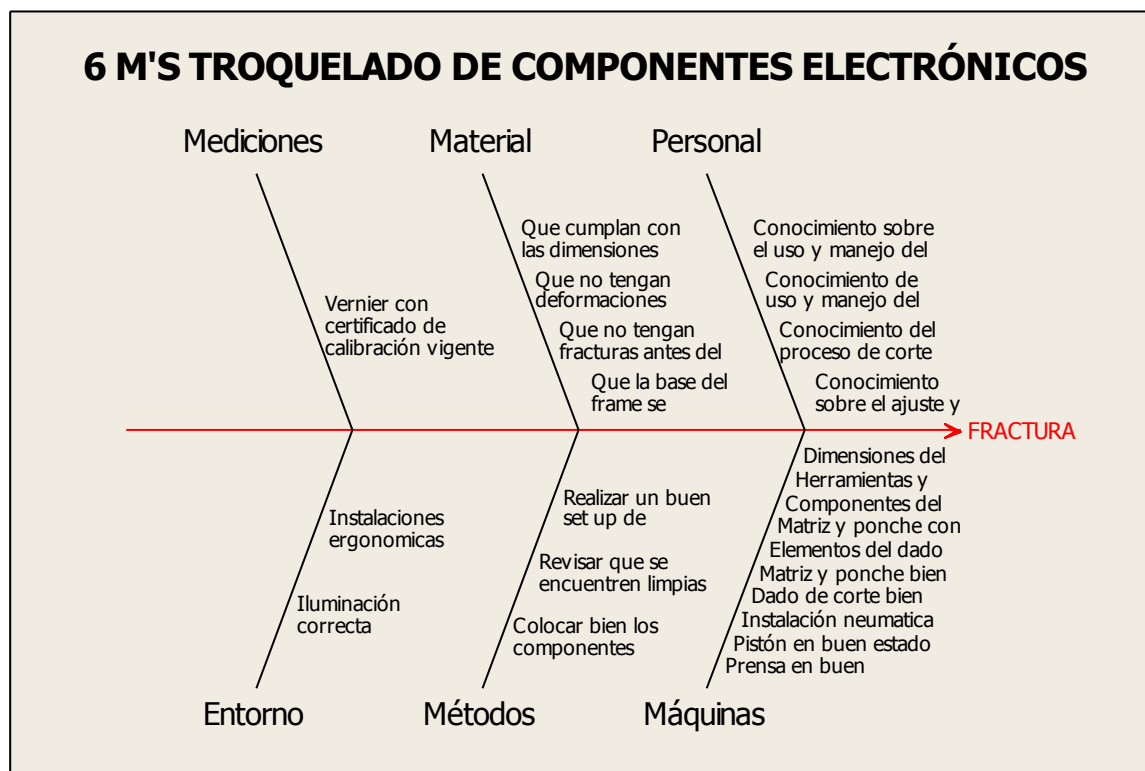
En esta fase de la metodología propuesta DMAIC DoE es muy importante seleccionar el diseño de experimentos adecuado para este caso de estudio. El objetivo del diseño de experimentos es estudiar si cuando se utiliza un determinado tratamiento se produce una mejora en el proceso o no. Para ello se debe experimentar aplicando el tratamiento y no aplicándolo. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación [43].

Como primer paso para ahondar en los posibles factores que afectan las características de calidad en cuanto a su magnitud y en cuanto a su variabilidad sería profundizar en el proceso, por ello realizamos un análisis de entradas y salidas del proceso de troquelado. En la tabla 3-6 se muestra el proceso.

**Tabla 3- 6 Entradas y salidas del proceso de corte**

| SIPOC DE PROCESO DE CORTE POR TROQUEL DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS |   |  |  |            |
|---|---|--|--|------------|
| Proveedor   | Entrada   | Proceso                                | Salida                                       | Cliente    |
| Moldeo  | Pieza con dimensión de .125" +/- .008"                                    | Troquelado de componentes electrónicos | Pieza con dimensión de .125" +/- .008"       | Inspección |
|   | Piezas sin fracturas  |  | Piezas sin fracturas                         |            |
|   | Pieza limpia de exceso de material plástico sobre la superficie del frame |  | Pieza sin rebabas<br>Pieza sin deformaciones |            |

Una vez revisados y analizados los requerimientos de entrada y salida, realizamos un estudio de 6M'S mostrado en la tabla 3-7 y representado con un diagrama Ishikawa que se muestra en la gráfica 3-6.



**Gráfica 3. 6 Diagrama de Causa Efecto para la problemática de troquelado**

**Tabla 3- 7 6M'S de troquelado.**

| <b>M. de obra</b>   | <b>Medio ambiente</b>     | <b>Maquinaria</b>   | <b>Método</b>  | <b>Medición</b>                                | <b>Material</b>   |
|---|---------------------------|---|--|--|---|
| Conocimiento sobre el uso y manejo del estereoscopio para inspección visual | Iluminación correcta      | Prensa en buen estado   | Colocar bien los componentes electrónicos en el dado         | Vernier con certificado de calibración vigente | Que cumplan con las dimensiones correctas                       |
| Conocimiento de uso y manejo del calibrador                                 | Instalaciones ergonómicas | Pistón en buen estado   | Revisar que se encuentren limpias las piezas antes de cortar |  | Que no tengan deformaciones                                     |
| Conocimiento del proceso de corte   |                           | Instalación neumática en buenas condiciones                                       | Realizar un buen set up de troquelado                        |  | Que no tengan fracturas antes del corte                         |
| Conocimiento sobre el ajuste y preparación del proceso de troquelado        |                           | Dado de corte bien ajustado a base de prensa                                      |  |  | Que la base del frame se encuentre limpia sin material plástico |
|   |                           | Matriz y ponche bien afilados   |  |  |   |
|   |                           | Elementos del dado bien balanceados   |  |  |   |
|   |                           | Matriz y ponche con la claridad correcta  |  |  |   |
|   |                           | Componentes del troquel bien ensamblados  |  |  |   |
|   |                           | Herramientas y suministros en buen estado   |  |  |   |
|   |                           | Dimensiones del ponche que cumplan con los requerimientos de la parte a troquelar |  |  |   |

Al descartar de factores realizado con el equipo de trabajo, nos concentramos en el troquel o dado de corte y sus características, debido a que en el estudio de 6M'S es este el que contiene mayor influencia en el proceso. Introduciéndonos en los detalles del dado. A continuación se muestra la tabla 3-8, que muestra las variables potenciales que afectan a la calidad del inductor:

**Tabla 3- 8 Factores potenciales que afectan la calidad del inductor.**

| <b>No.</b> | <b>Descripción</b>   | <b>Variable</b> | <b>Unidad</b>               |
|------------|--|-----------------|-----------------------------|
| 1          | Altura entre el punzón y la matriz   | C               | Dimensión (pulgadas)        |
| 2          | Tipo de resorte del botador  | C               | Resistencia a la compresión |
| 3          | Ángulo del punzón  | C               | Grados decimales            |
| 4          | Presión del pistón   | C               | PSI                         |
| 5          | Tope que limita el viaje del punzón (traslape entre el punzón y la matriz) | C               | Dimensión (pulgadas)        |
| 6          | Filo del punzón y matriz   | X               | Proveedor                   |
| 7          | Claridad entre punzón y matriz   | X               | Proveedor                   |
| 8          | Dimensión del punzón   | S               | Proveedor                   |
| 9          | Diseño del troquel   | S               | Proveedor                   |
| 10         | Limpieza de las piezas   | R               | Proveedor                   |
| 11         | Temperatura ambiente   | R               | Grados Celsius              |

**Variables:**

C: Controlable

R: Ruido

X: Crítico

S: Estándar

Definir los niveles “óptimos” en que debe fijarse cada parámetro o factor a fin de optimizar la operación del producto y hacerlo lo más robusto posible. La tabla 3-9 muestra este paso en el método.

**Tabla 3- 9 Variables potenciales que afectan la calidad del inductor con sus respectivos niveles de especificación superior e inferior.**

| No. | Descripción  | Variable | Unidad                      | Designación   | Nivel Bajo | Nivel Alto |
|-----|--|----------|-----------------------------|---------------|------------|------------|
| 1   | Altura entre el punzón y la matriz   | C        | Dimensión (pulgadas)        | Altura        | 1.25       | 1.4        |
| 2   | Tipo de resorte del botador  | C        | Resistencia a la compresión | Color         | Verde      | Rojo       |
| 3   | Ángulo del punzón  | C        | Grados decimales            | Grados        | 0          | 0.06       |
| 4   | Presión del pistón   | C        | PSI                         | Presión       | 60         | 80         |
| 5   | Tope que limita el viaje del punzón (traslape entre el punzón y la matriz) | C        | Dimensión (pulgadas)        | Tope          | -0.005     | -0.01      |
| 6   | Filo del punzón y matriz   | X        | Proveedor                   | Mantenimiento |            |            |
| 7   | Claridad entre punzón y matriz   | X        | Proveedor                   | Mantenimiento |            |            |
| 8   | Dimensión del punzón   | S        | Proveedor                   | Mantenimiento |            |            |
| 9   | Diseño del troquel   | S        | Proveedor                   | Mantenimiento |            |            |
| 10  | Limpieza de las piezas   | R        | Proveedor                   | Moldeo        |            |            |
| 11  | Temperatura ambiente   | R        | Grados Celsius              | °C            |            |            |

Identificar factores que se consideran críticos, estándar o de ruido por no ser controlables, o no querer controlar por situaciones externas a nuestro alcance como el costo de inferir en estos lo podemos apreciar en la tabla 3-10.

**Tabla 3- 10 Factores de ruido para el proceso del inductor.**

| No. | Descripción  | Variable | Unidad                      | Designación   | Nivel Bajo | Nivel Alto |
|-----|--|----------|-----------------------------|---------------|------------|------------|
| 1   | Altura entre el punzón y la matriz   | C        | Dimensión (pulgadas)        | Altura        | 1.25       | 1.4        |
| 2   | Tipo de resorte del botador  | C        | Resistencia a la compresión | Color         | Verde      | Rojo       |
| 3   | Ángulo del punzón  | C        | Grados decimales            | Grados        | 0          | 0.06       |
| 4   | Presión del pistón   | C        | PSI                         | Presión       | 60         | 80         |
| 5   | Tope que limita el viaje del punzón (traslape entre el punzón y la matriz) | C        | Dimensión (pulgadas)        | Tope          | -0.005     | -0.01      |
| 6   | Filo del punzón y matriz   | X        | Proveedor                   | Mantenimiento |            |            |
| 7   | Claridad entre punzón y matriz   | X        | Proveedor                   | Mantenimiento |            |            |
| 8   | Dimensión del punzón   | S        | Proveedor                   | Mantenimiento |            |            |
| 9   | Diseño del troquel   | S        | Proveedor                   | Mantenimiento |            |            |
| 10  | Limpieza de las piezas   | R        | Proveedor                   | Moldeo        |            |            |
| 11  | Temperatura ambiente   | R        | Grados Celsius              | °C            |            |            |

**Se toman en cuenta**

**Se descartan**

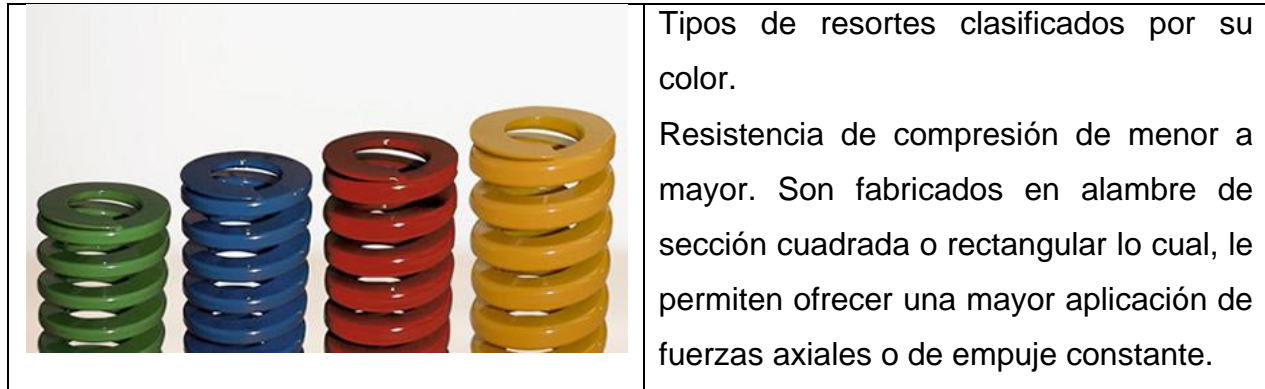
Se toman en cuenta estos factores debido a que se pueden controlar o variar su designación sin perjudicar el proceso actual o la operación establecida, también porque se observó viable de realizarles ajustes en sus parámetros.

### **3.6.1 Variables potenciales del proceso de troquelado**

Considerando las variables potenciales descritas en la tabla 3-10, tenemos enlistadas cuatro que son consideradas variables controladas, las cuales son:

1. *Altura entre el punzón y la matriz.* En los últimos años se han realizado ajustes de troquelado por parte del área de mantenimiento y por personal de producción, siendo este último el operador del proceso de corte o troquelado de los inductores. Para el proceso de corte de los inductores diferentes alturas son colocadas en el set up de troquelado, ya que no se tiene un estándar o no se cuenta con instrucciones de trabajo donde se refiera a una determinada altura para hacer el ajuste del troquel.

2. *Tipo del resorte del botador.* En el proceso actual el botador está sometido a una presión determinada por la fuerza de compresión que ejerce el punzón cuando baja para hacer el efecto de corte y entra en contacto entre las piezas, la matriz y el botador. Los resortes (ver figura 3.6) que forman parte del botador se comprimen y cuando el punzón sube se descomprime para tomar la forma original y por efecto del mismo expulsar las piezas de la matriz. El pisador cuenta con cuatro resortes de acuerdo al diseño del mismo. Existen diferentes tipos de resortes de compresión. En la empresa se cuenta con resortes rojos que son los que tienen el alambre de mayor tamaño por lo que son los más resistentes a la compresión; los de color verde con menor tamaño del alambre que tienen menor resistencia a la compresión.



**Figura 3. 6 Tipos de resortes. Fuente [62].**

3. *Ángulo del punzón.* Existen varios componentes en el troquel, pero el punzón es uno de los más importantes y existen diversidad de geometrías. En nuestro caso se utiliza una geometría paralela a la matriz, a esto se le conoce como punzón recto o cero grados, sin embargo según la literatura sobre este tema consideran variar el punzón a grados para disminuir las fuerzas a las que se somete por efectos de corte.

4. *Presión del pistón.* Este factor está implícitamente ligado a la velocidad con que se desplaza el punzón hacia la matriz. La matriz queda fija a la base del troquel que a su vez está ensamblado a la prensa tipo C. La tapa del troquel está fija al pistón, a su vez el punzón está ensamblado a la tapa, y estos elementos juntos se desplazan por los postes en un movimiento vertical de arriba hacia abajo. La presión puede ser controlada por una válvula estranguladora que cuenta con un manómetro.

5. *Tope.* La función principal del tope es limitar el recorrido del punzón que se realiza por efectos de la salida del pistón que hace que los componentes sujetos a este bajen verticalmente de arriba hacia abajo hasta hacer contacto con las piezas de trabajo, la matriz y el botador para realizarse el corte. Aquí se realiza un traslape que por lógica es necesario para cortar las terminales.

### **3.7 Desarrollo de la fase Experimental**

En esta etapa se toman en cuenta diferentes métodos o diseños experimentales. Las características que se llevarán a cabo para el desarrollo experimental están enfocadas en utilizar un diseño factorial, ya que los factores de interés no exceden de cinco

factores, además de las características del problema donde es muy viable hacerlo con dos niveles, por lo tanto en esta primera etapa se alinea a un diseño del tipo  $2^k$ .

Un diseño factorial es un tipo de experimento diseñado que permite estudiar los efectos que pueden tener varios factores sobre una respuesta. Al realizar un experimento, el hecho de variar los niveles de todos los factores al mismo tiempo en lugar de uno a la vez permite estudiar las interacciones entre los factores.

Un diseño factorial completo es un diseño en el cual los investigadores miden las respuestas con todas las combinaciones de los niveles de los factores [63].

Otro tipo de diseño factorial sería una fracción del diseño completo el cual los investigadores solo realizan un subconjunto seleccionado o "fracción" de las corridas experimentales incluidas en el diseño factorial completo. Los diseños factoriales fraccionados son una opción adecuada cuando los recursos son limitados o el número de factores incluidos en el diseño es grande, porque utilizan menos corridas que los diseños factoriales completos.

Un diseño factorial fraccionado utiliza un subconjunto de un diseño factorial completo, por lo que parte de los efectos principales y las interacciones de dos factores se confunden y no se pueden separar de los efectos de otras interacciones de orden superior. Por lo general, los investigadores están dispuestos a presuponer que los efectos de orden superior son insignificantes para obtener información sobre los efectos principales y las interacciones de orden bajo con menos corridas [64].

La experimentación juega un papel fundamental en virtualmente todos los campos de la investigación y el desarrollo. La meta de la experimentación es obtener información de calidad. La experimentación se debe planificar (diseñar) cuidadosamente para que proporcione la información buscada. La experimentación es normalmente cara, y la capacidad de experimentar está limitada por el coste en tiempo y en recursos tales como el personal o mano de obra, productos de partida, disponibilidad de producción entre otras. Por tanto, una organización óptima de la experimentación deberá

contemplar el menor número de experimentos que permita obtener la información buscada [65].

Tomando en cuenta todos estos argumentos con el equipo de investigación se toma la decisión de realizar un diseño factorial completa con cinco factores y una réplica.

### **3.7.1 Controles y plan de experimentación para variables potenciales**

Como parte del plan de experimentación en esta fase de la metodología propuesta se realizó un trabajo de concientización con el personal involucrado en cuanto a los beneficios y alcances del diseño de experimentos, debido a que no es un tema conocido ni en el que ellos se encuentren familiarizados.

Por otra parte se hizo un plan de dirección de tiempos dirigido por la Dra. Karla Isabel Velázquez Victorica, directora de tesis, para el actuar de la experimentación. Se realizó de manera rigurosa, apegado al plan en tiempo y forma. Para lograr el éxito se involucró a la gerencia, planeación, supervisor general, supervisor de área y guía de línea de la empresa, con el fin de abrir un espacio del tiempo para llevar a cabo esta.

Parte de las herramientas utilizadas fueron hojas con documentación del orden de la experimentación, seguir con las instrucciones de trabajo habituales básicas, ya que hasta el momento no cuentan con parámetros establecidos para cada número de parte. Como controles sobre la experimentación (ver figura 3.7) se incluyeron equipos de medición asociados a cada factor. Se utilizaron block gauges de precisión para controlar la **altura**, un manómetro para el control de la **presión**, transportador de precisión para revisión del **Ángulo de la navaja**, calibrador de altura para revisión de dimensión del **tope**, esto incluye las medidas correspondientes entre base y matriz como a su vez tapa y punzón, galgas de precisión para el cambio de alturas del mismo. Además de utilizar dos tipos de **resortes** donde por cada set up se utilizaron un set de cuatro resortes.

Los resortes de compresión son resortes helicoidales de espiras abiertas construidos para oponerse a la compresión a lo largo del eje del enrollado. Los Resortes de Compresión Helicoidales son la configuración más común de resortes. Generalmente, son puestos sobre un poste o dentro de un agujero. Cuando pones una carga en el

resorte de compresión, compactándolo, éste empuja de regreso en contra de la carga intentando regresar a su longitud original. Los resortes de compresión ofrecen resistencia a fuerzas de compresión lineales (empuje) y de hecho son uno de los dispositivos de almacenamiento de energía más eficientes [66].

Estos son utilizados en el troquel para expulsar las piezas de la cavidad de la matriz. En este caso se incluyeron a la experimentación los de color rojo que son para carga pesada es decir se requiere de mayor fuerza para ser comprimidos y los de color verde que oponen menor resistencia.

Imágenes muestran controles del experimento.



**Figura 3. 7 Instrumentos de control**

Una vez listo todo se efectuó el siguiente diseño factorial completo representado en la tabla 3-11, con cinco factores que arrojan treinta y dos corridas con una replica. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 3-12.

**Tabla 3- 11 Diseño experimental seleccionado (A)**

| Orden Est | Altura (pulgadas) | Resorte | Ángulo | Presión | Tope (pulgadas) |
|-----------|-------------------|---------|--------|---------|-----------------|
| 15        | 0.4               | ROJO    | 0.06   | 90      | -0.01           |
| 21        | 0.4               | VERDE   | 0.06   | 70      | -0.005          |
| 25        | 0.4               | VERDE   | 0      | 90      | -0.005          |
| 1         | 0.4               | VERDE   | 0      | 70      | -0.01           |
| 19        | 0.4               | ROJO    | 0      | 70      | -0.005          |
| 8         | 0.8               | ROJO    | 0.06   | 70      | -0.01           |
| 12        | 0.8               | ROJO    | 0      | 90      | -0.01           |
| 6         | 0.8               | VERDE   | 0.06   | 70      | -0.01           |
| 7         | 0.4               | ROJO    | 0.06   | 70      | -0.01           |
| 2         | 0.8               | VERDE   | 0      | 70      | -0.01           |
| 13        | 0.4               | VERDE   | 0.06   | 90      | -0.01           |
| 14        | 0.8               | VERDE   | 0.06   | 90      | -0.01           |
| 31        | 0.4               | ROJO    | 0.06   | 90      | -0.005          |
| 10        | 0.8               | VERDE   | 0      | 90      | -0.01           |
| 20        | 0.8               | ROJO    | 0      | 70      | -0.005          |
| 11        | 0.4               | ROJO    | 0      | 90      | -0.01           |
| 29        | 0.4               | VERDE   | 0.06   | 90      | -0.005          |
| 24        | 0.8               | ROJO    | 0.06   | 70      | -0.005          |
| 9         | 0.4               | VERDE   | 0      | 90      | -0.01           |
| 18        | 0.8               | VERDE   | 0      | 70      | -0.005          |
| 3         | 0.4               | ROJO    | 0      | 70      | -0.01           |
| 27        | 0.4               | ROJO    | 0      | 90      | -0.005          |
| 32        | 0.8               | ROJO    | 0.06   | 90      | -0.005          |
| 22        | 0.8               | VERDE   | 0.06   | 70      | -0.005          |
| 26        | 0.8               | VERDE   | 0      | 90      | -0.005          |
| 17        | 0.4               | VERDE   | 0      | 70      | -0.005          |
| 4         | 0.8               | ROJO    | 0      | 70      | -0.01           |
| 28        | 0.8               | ROJO    | 0      | 90      | -0.005          |
| 23        | 0.4               | ROJO    | 0.06   | 70      | -0.005          |
| 5         | 0.4               | VERDE   | 0.06   | 70      | -0.01           |
| 16        | 0.8               | ROJO    | 0.06   | 90      | -0.01           |
| 30        | 0.8               | VERDE   | 0.06   | 90      | -0.005          |

**Tabla 3- 12 Resultados de las inspecciones de los inductores**

| Orden Est | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     | RESPUESTA |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| 15        | 0.0060 | 0.0090 | 0.0220 | 0.0130 | 0.005  | 0.005  | 0.011  | 0.017  | 0.0155 | 0.0225 | 0.017  | 0.007  | 0.01   | 0.009  | 0.019  | 0.009  | 0.0105 | 0.0135 | 0.018  | 0.006  | 0.0123    |
| 21        | 0.014  | 0.009  | 0.012  | 0.007  | 0.013  | 0.02   | 0.025  | 0.017  | 0.006  | 0.009  | 0.008  | 0.008  | 0.01   | 0.02   | 0.009  | 0.006  | 0.007  | 0.008  | 0.0235 | 0.0065 | 0.0119    |
| 25        | 0.006  | 0.007  | 0.012  | 0.006  | 0.007  | 0.007  | 0.012  | 0.01   | 0.01   | 0.016  | 0.007  | 0.007  | 0.013  | 0.009  | 0.0055 | 0.0035 | 0.006  | 0.008  | 0.0125 | 0.0115 | 0.0088    |
| 1         | 0.0065 | 0.0055 | 0.007  | 0.006  | 0.0045 | 0.005  | 0.009  | 0.01   | 0.005  | 0.008  | 0.0095 | 0.006  | 0.0035 | 0.007  | 0.006  | 0.002  | 0.0045 | 0.0185 | 0.005  | 0.004  | 0.0066    |
| 19        | 0.005  | 0.007  | 0.008  | 0.0065 | 0.0015 | 0.0045 | 0.006  | 0.008  | 0.004  | 0.001  | 0.008  | 0.01   | 0.007  | 0.006  | 0.009  | 0.005  | 0.0035 | 0.0045 | 0.0055 | 0.0035 | 0.0057    |
| 8         | 0.0115 | 0.0085 | 0.0075 | 0.0075 | 0.0065 | 0.0125 | 0.0165 | 0.0065 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0075 | 0.0045 | 0.0015 | 0.0105 | 0.0075 | 0.007  | 0.015  | 0.006  | 0.002  | 0.0076    |
| 12        | 0.011  | 0.0165 | 0.008  | 0.007  | 0.0125 | 0.0155 | 0.0195 | 0.0185 | 0.016  | 0.014  | 0.008  | 0.0065 | 0.011  | 0.011  | 0.008  | 0.006  | 0.0085 | 0.0045 | 0.013  | 0.0015 | 0.0108    |
| 6         | 0.0055 | 0.0095 | 0.032  | 0.013  | 0.005  | 0.014  | 0.007  | 0.0055 | 0.0045 | 0.004  | 0.0055 | 0.0065 | 0.015  | 0.003  | 0.0095 | 0.0075 | 0.0055 | 0.0035 | 0.0125 | 0.0075 | 0.0088    |
| 7         | 0.0200 | 0.009  | 0.0065 | 0.0075 | 0.0085 | 0.0185 | 0.0175 | 0.0205 | 0.007  | 0.014  | 0.0075 | 0.0095 | 0.007  | 0.007  | 0.0065 | 0.0175 | 0.0105 | 0.0075 | 0.0095 | 0.0055 | 0.0109    |
| 2         | 0.0085 | 0.0095 | 0.0065 | 0.0065 | 0.01   | 0.014  | 0.007  | 0.007  | 0.0025 | 0.0085 | 0.005  | 0.009  | 0.0105 | 0.0105 | 0.0095 | 0.0045 | 0.006  | 0.007  | 0.0135 | 0.0125 | 0.0084    |
| 13        | 0.016  | 0.005  | 0.0115 | 0.0075 | 0.015  | 0.018  | 0.01   | 0.012  | 0.0135 | 0.0135 | 0.015  | 0.024  | 0.014  | 0.015  | 0.015  | 0.016  | 0.0085 | 0.0185 | 0.0145 | 0.0305 | 0.0147    |
| 14        | 0.018  | 0.009  | 0.0185 | 0.0065 | 0.0105 | 0.0075 | 0.0055 | 0.0055 | 0.018  | 0.015  | 0.0095 | 0.0225 | 0.017  | 0.01   | 0.009  | 0.01   | 0.008  | 0.005  | 0.0145 | 0.0085 | 0.0114    |
| 31        | 0.0155 | 0.0065 | 0.0035 | 0.0045 | 0.005  | 0.017  | 0.0105 | 0.017  | 0.0135 | 0.0075 | 0.0155 | 0.0095 | 0.0095 | 0.0085 | 0.01   | 0.005  | 0.0105 | 0.0075 | 0.0175 | 0.0075 | 0.0100    |
| 10        | 0.006  | 0.007  | 0.0065 | 0.0165 | 0.009  | 0.009  | 0.007  | 0.005  | 0.005  | 0.006  | 0.0085 | 0.0075 | 0.0045 | 0.0065 | 0.011  | 0.007  | 0.0075 | 0.0085 | 0.0085 | 0.0065 | 0.0077    |
| 20        | 0.017  | 0.018  | 0.014  | 0.017  | 0.0075 | 0.0065 | 0.017  | 0.009  | 0.009  | 0.013  | 0.0155 | 0.0135 | 0.0065 | 0.0065 | 0.0105 | 0.0065 | 0.0195 | 0.0155 | 0.009  | 0.008  | 0.0120    |
| 11        | 0.0135 | 0.0225 | 0.011  | 0.008  | 0.0085 | 0.0095 | 0.0215 | 0.0185 | 0.0165 | 0.0185 | 0.013  | 0.013  | 0.004  | 0.003  | 0.014  | 0.011  | 0.005  | 0.007  | 0.009  | 0.015  | 0.0121    |
| 29        | 0.0135 | 0.0095 | 0.0115 | 0.0215 | 0.0125 | 0.0325 | 0.018  | 0.01   | 0.008  | 0.012  | 0.019  | 0.013  | 0.006  | 0.012  | 0.009  | 0.012  | 0.006  | 0.009  | 0.009  | 0.01   | 0.0127    |
| 24        | 0.016  | 0.017  | 0.036  | 0.039  | 0.035  | 0.02   | 0.024  | 0.021  | 0.03   | 0.023  | 0.012  | 0.02   | 0.016  | 0.022  | 0.011  | 0.011  | 0.009  | 0.016  | 0.022  | 0.021  | 0.0211    |
| 9         | 0.008  | 0.011  | 0.01   | 0.01   | 0.009  | 0.005  | 0.009  | 0.019  | 0.012  | 0.012  | 0.011  | 0.012  | 0.012  | 0.013  | 0.015  | 0.012  | 0.008  | 0.009  | 0.006  | 0.007  | 0.0105    |
| 18        | 0.0095 | 0.0115 | 0.019  | 0.01   | 0.001  | 0.005  | 0.01   | 0.007  | 0.003  | 0.003  | 0.005  | 0.007  | 0.012  | 0.012  | 0.014  | 0.012  | 0.008  | 0.006  | 0.004  | 0.005  | 0.0082    |
| 3         | 0.013  | 0.013  | 0.012  | 0.014  | 0.009  | 0.007  | 0.015  | 0.019  | 0.008  | 0.006  | 0.012  | 0.013  | 0.012  | 0.011  | 0.01   | 0.013  | 0.011  | 0.008  | 0.012  | 0.007  | 0.0113    |
| 27        | 0.005  | 0.004  | 0.02   | 0.014  | 0.012  | 0.004  | 0.005  | 0.007  | 0.014  | 0.015  | 0.006  | 0.004  | 0.008  | 0.009  | 0.006  | 0.004  | 0.008  | 0.01   | 0.006  | 0.016  | 0.0089    |
| 32        | 0.0155 | 0.0165 | 0.013  | 0.013  | 0.015  | 0.014  | 0.009  | 0.014  | 0.027  | 0.011  | 0.015  | 0.017  | 0.031  | 0.014  | 0.008  | 0.009  | 0.012  | 0.02   | 0.01   | 0.016  | 0.0150    |
| 22        | 0.01   | 0.009  | 0.005  | 0.012  | 0.007  | 0.019  | 0.0085 | 0.0175 | 0.007  | 0.003  | 0.019  | 0.011  | 0.005  | 0.004  | 0.011  | 0.007  | 0.014  | 0.009  | 0.014  | 0.019  | 0.0106    |
| 26        | 0.007  | 0.005  | 0.007  | 0.009  | 0.011  | 0.012  | 0.003  | 0.007  | 0.017  | 0.014  | 0.015  | 0.011  | 0.012  | 0.013  | 0.006  | 0.005  | 0.019  | 0.012  | 0.009  | 0.007  | 0.0101    |
| 17        | 0.011  | 0.012  | 0.016  | 0.016  | 0.008  | 0.008  | 0.008  | 0.008  | 0.021  | 0.031  | 0.009  | 0.014  | 0.011  | 0.014  | 0.015  | 0.011  | 0.022  | 0.011  | 0.023  | 0.017  | 0.0143    |
| 4         | 0.008  | 0.006  | 0.009  | 0.01   | 0.01   | 0.009  | 0.011  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.009  | 0.014  | 0.009  | 0.003  | 0.007  | 0.005  | 0.004  | 0.007  | 0.006  | 0.011  | 0.0084    |
| 28        | 0.004  | 0.007  | 0.006  | 0.006  | 0.007  | 0.004  | 0.009  | 0.009  | 0.008  | 0.013  | 0.007  | 0.01   | 0.01   | 0.011  | 0.008  | 0.009  | 0.011  | 0.01   | 0.009  | 0.014  | 0.0086    |
| 23        | 0.0145 | 0.0155 | 0.0095 | 0.0045 | 0.0235 | 0.0095 | 0.004  | 0.002  | 0.0195 | 0.0245 | 0.021  | 0.005  | 0.0085 | 0.0065 | 0.0065 | 0.0045 | 0.0145 | 0.0105 | 0.0095 | 0.0065 | 0.0110    |
| 5         | 0.01   | 0.011  | 0.0125 | 0.0105 | 0.013  | 0.018  | 0.02   | 0.023  | 0.024  | 0.018  | 0.0095 | 0.0095 | 0.0135 | 0.0215 | 0.026  | 0.021  | 0.01   | 0.012  | 0.019  | 0.023  | 0.0163    |
| 16        | 0.001  | 0.0085 | 0.005  | 0.004  | 0.023  | 0.016  | 0.0085 | 0.0095 | 0.0225 | 0.0085 | 0.0045 | 0.0085 | 0.0015 | 0.0055 | 0.0055 | 0.0155 | 0.0045 | 0.0065 | 0.0085 | 0.0095 | 0.0088    |
| 30        | 0.0075 | 0.0185 | 0.0095 | 0.0045 | 0.0055 | 0.0045 | 0.0075 | 0.0045 | 0.0125 | 0.0125 | 0.008  | 0.009  | 0.0115 | 0.0045 | 0.0075 | 0.0125 | 0.0105 | 0.0065 | 0.0085 | 0.0165 | 0.0091    |

Se inspeccionaron 320 componentes, de los cuales arrojaron 640 medidas que posteriormente fueron promediadas para obtener las 32 respuestas del experimento, estas se muestran en la tabla 3-13.

**Tabla 3- 13 Resultados del diseño experimental (A)**

| Altura (pulgadas) | Resorte | Ángulo | Presión | Tope (pulgadas) | RESPUESTA |
|-------------------|---------|--------|---------|-----------------|-----------|
| 0.4               | ROJO    | 0.06   | 90      | -0.01           | 0.0123    |
| 0.4               | VERDE   | 0.06   | 70      | -0.005          | 0.0119    |
| 0.4               | VERDE   | 0      | 90      | -0.005          | 0.0088    |
| 0.4               | VERDE   | 0      | 70      | -0.01           | 0.0066    |
| 0.4               | ROJO    | 0      | 70      | -0.005          | 0.0057    |
| 0.8               | ROJO    | 0.06   | 70      | -0.01           | 0.0076    |
| 0.8               | ROJO    | 0      | 90      | -0.01           | 0.0108    |
| 0.8               | VERDE   | 0.06   | 70      | -0.01           | 0.0088    |
| 0.4               | ROJO    | 0.06   | 70      | -0.01           | 0.0109    |
| 0.8               | VERDE   | 0      | 70      | -0.01           | 0.0084    |
| 0.4               | VERDE   | 0.06   | 90      | -0.01           | 0.0147    |

|     |       |      |    |        |        |
|-----|-------|------|----|--------|--------|
| 0.8 | VERDE | 0.06 | 90 | -0.01  | 0.0114 |
| 0.4 | ROJO  | 0.06 | 90 | -0.005 | 0.0100 |
| 0.8 | VERDE | 0    | 90 | -0.01  | 0.0077 |
| 0.8 | ROJO  | 0    | 70 | -0.005 | 0.0120 |
| 0.4 | ROJO  | 0    | 90 | -0.01  | 0.0121 |
| 0.4 | VERDE | 0.06 | 90 | -0.005 | 0.0127 |
| 0.8 | ROJO  | 0.06 | 70 | -0.005 | 0.0211 |
| 0.4 | VERDE | 0    | 90 | -0.01  | 0.0105 |
| 0.8 | VERDE | 0    | 70 | -0.005 | 0.0082 |
| 0.4 | ROJO  | 0    | 70 | -0.01  | 0.0113 |
| 0.4 | ROJO  | 0    | 90 | -0.005 | 0.0089 |
| 0.8 | ROJO  | 0.06 | 90 | -0.005 | 0.0150 |
| 0.8 | VERDE | 0.06 | 70 | -0.005 | 0.0106 |
| 0.8 | VERDE | 0    | 90 | -0.005 | 0.0101 |
| 0.4 | VERDE | 0    | 70 | -0.005 | 0.0143 |
| 0.8 | ROJO  | 0    | 70 | -0.01  | 0.0084 |
| 0.8 | ROJO  | 0    | 90 | -0.005 | 0.0086 |
| 0.4 | ROJO  | 0.06 | 70 | -0.005 | 0.0110 |
| 0.4 | VERDE | 0.06 | 70 | -0.01  | 0.0163 |
| 0.8 | ROJO  | 0.06 | 90 | -0.01  | 0.0088 |
| 0.8 | VERDE | 0.06 | 90 | -0.005 | 0.0091 |

La fase de experimentar se concluye preliminarmente aquí, con los resultados obtenidos.

### 3.8 Fase de Análisis de los resultados

Una vez concluidas las treinta y dos pruebas del diseño de experimentos por la metodología factorial para los componentes electrónicos, se derivó el análisis estadístico de los datos, con la ayuda del software Minitab. Enseguida los resultados:

#### Optimización de respuesta

Parámetros

|           | Meta     | Inferior | Objetivo | Superior | Ponderación | Importar |
|-----------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|
| RESPUESTA | Objetivo | -0.01    | 0        | 0.01     | 1           | 1        |

Solución global

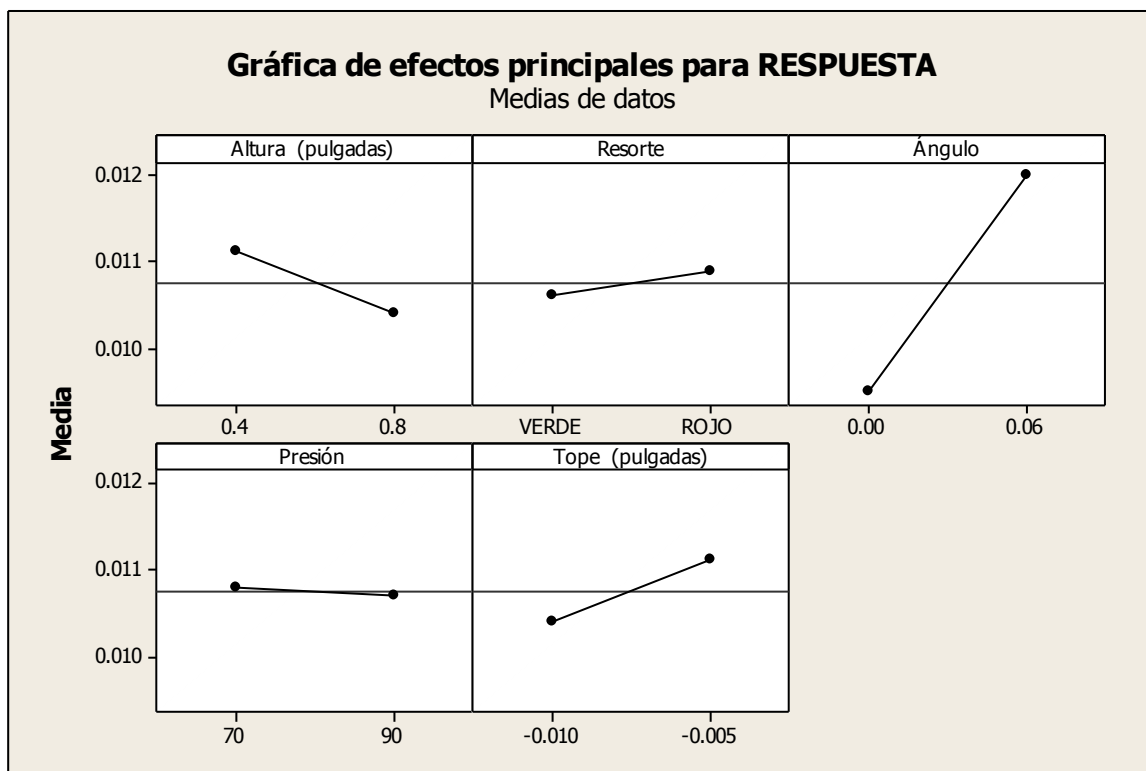
Altura (pul = 0.4  
 Resorte = 1 (ROJO)  
 Ángulo = 0  
 Presión = 70  
 Tope (pulga = -0.005

Respuestas pronosticadas

RESPUESTA = 0.005675, deseabilidad = 0.432500

Deseabilidad compuesta = 0.432500

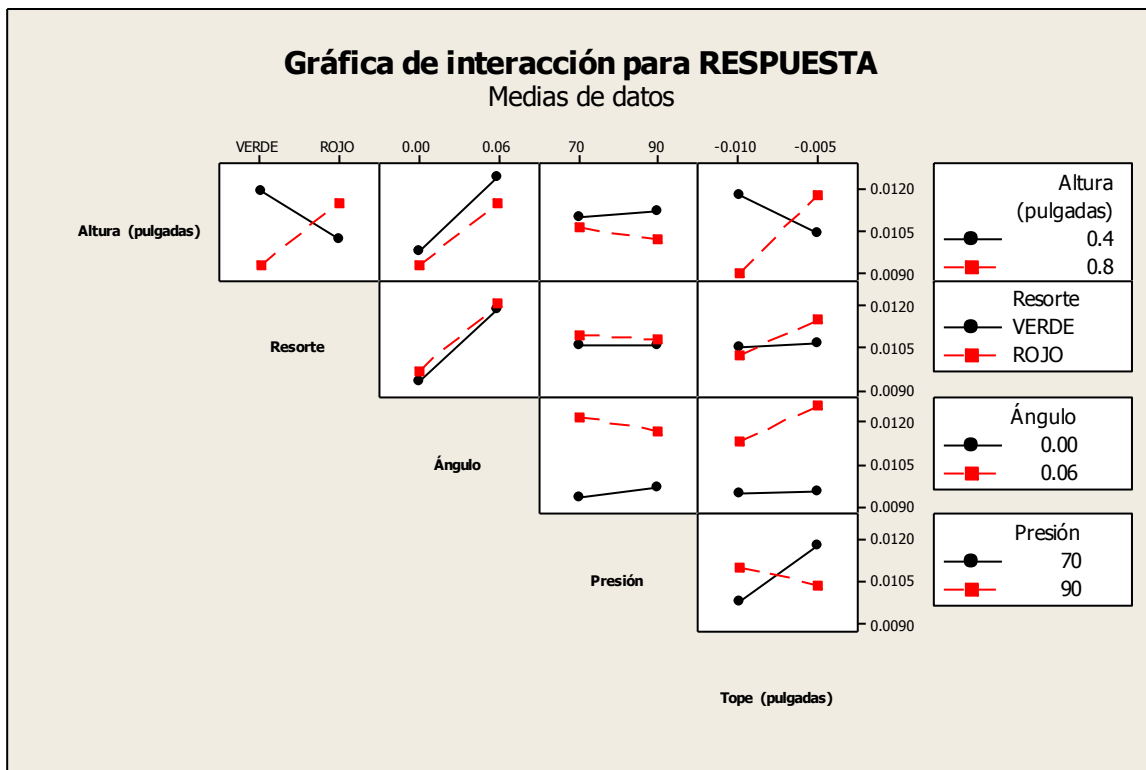
Realizando el análisis gráfico podemos identificar varios descubrimientos de esta investigación estadística. Las gráficas 3.7 y 3.8 nos muestran dichos hallazgos.



**Gráfica 3. 7 Efectos principales para la respuesta**

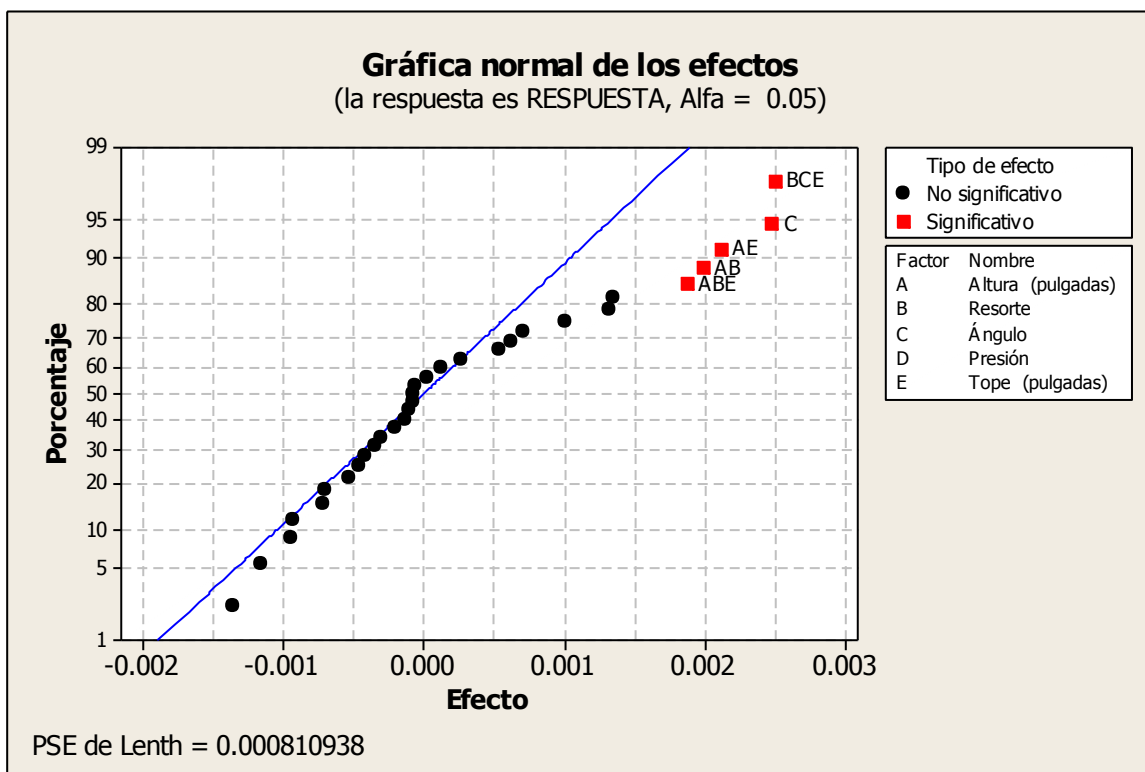
Esta gráfica nos indica el efecto de las variables individuales sobre la variable de respuesta. En nuestro caso queremos optimizar la respuesta en busca del mínimo de fractura, es decir el objetivo sería longitud o dimensión cero, sin fractura. Teniendo en cuenta o recapitalizando que un valor mayor a .005" milésimas de pulgada esta fuera del rango de especificación por lo tanto sería pieza defectuosa. Continuando con la

lectura de la gráfica es interesante observar el efecto del ángulo de la navaja y es que un ángulo igual a cero es donde se acerca más al objetivo y con el ángulo en sesenta milésimas incrementa considerablemente la dimensión de la fractura. En el caso de la presión y el resorte no parece afectar la respuesta, el tope y la altura quedan a consideración debido al pequeño margen de error de las características dimensionales del producto.



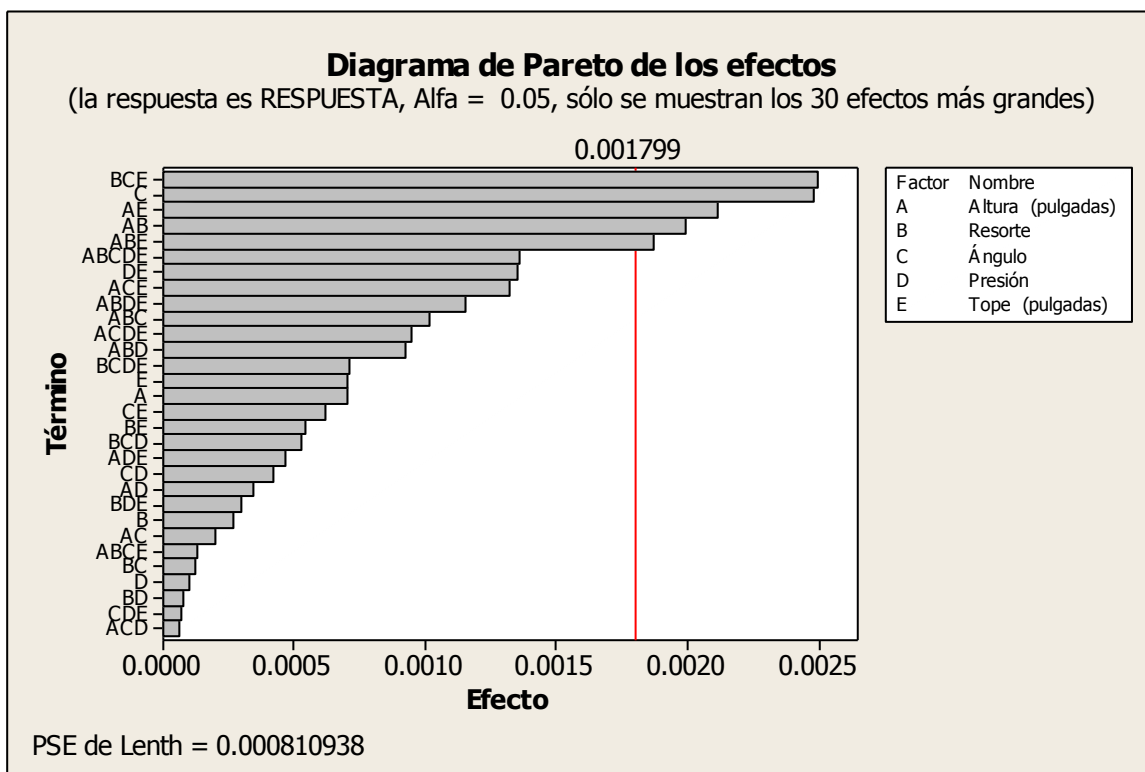
**Gráfica 3. 8 Interacciones de factores para la respuesta**

En la gráfica de interacción de las variables tenemos un cruce entre la altura y el resorte, altura y tope además de la presión con el tope. Es decir que interactúan los factores altura, resorte, tope y presión, cuatro de los cinco factores considerados en este diseño de experimentos. Todas estas afectan considerablemente la respuesta.



**Gráfica 3. 9 Normal de los efectos significativos**

En la gráfica 3.9 se aprecia claramente los efectos significativos y cabe destacar el efecto individual del Ángulo.



**Gráfica 3. 10 Diagrama de Pareto de los efectos sobre la respuesta**

Esta gráfica de Pareto es la más representativa del experimento, debido a la claridad con la que muestra los efectos significativos que afectan la variable de respuesta. En ella podemos apreciar los efectos significativos que afectan la respuesta los cuales son la combinación de resorte, ángulo y tope; ángulo; la combinación altura y tope; y la combinación altura resorte dicho esto de mayor a menor.

En la optimización de la respuesta buscando el valor mínimo nos arrojó la siguiente solución global.

Altura (pulgadas) = 0.4  
 Resorte = 1 (ROJO)  
 Ángulo (grados) = 0  
 Presión (PSI) = 70  
 Tope (pulgadas) = -0.005

Respuesta (pulgadas) = 0.005675

Como conclusión de este análisis de los resultados podemos destacar por la evidencia estadística que el ángulo es significativo, esto lo podemos apreciar en la gráfica 3.10, pero lo podemos descartar debido a que tuvo su mejor respuesta trabajando a cero grados, es decir que no hay necesidad de aumentar los grados de la navaja. La presión no resulto significativa por lo que descartamos este efecto y lo podemos manejar como constante, siguiendo el parámetro recomendado por el optimizador de la respuesta. Entre la altura y el tope se tienen sospechas debido a que el optimizador recomienda lo contrario de lo que se analizó en las gráficas de los efectos principales. Sin embargo la respuesta está fuera de especificaciones y se encuentra ligeramente por encima de los estándares de calidad del producto (pieza rechazada).

### **3.9 Fase de Mejora del proceso de troquelado de componentes electrónicos**

Por los avances mostrados en pro de mejorar los niveles de calidad del producto, la gerencia de la empresa está motivada y dispuesta a invertir en el proceso de corte por troquelado. Se pensaba hacer una fuerte inversión en un proceso alternativo, y más sofisticado para el corte de los componentes electrónicos (cortadora de laser) sin embargo los resultados muestran avances y dejan en evidencia la posible solución con el proceso actual.

La dimensión de la navaja se consideró un factor estándar o inamovible hasta ese momento en la selección de los factores debido a los costos de fabricación y a las modificaciones que serían necesarias hacer. Pero con esta experimentación obtuvimos hallazgos importantes que fueron muy claros para considerar hacer una nueva navaja a pesar de todo lo que implica hacerlo. Podemos destacar el compromiso de la compañía con respecto a la calidad de sus productos mostrándolo con la aprobación de la fabricación de una navaja con un espesor mayor a la actual, claro que con dimensiones de acuerdo a las especificaciones del inductor. Recordemos que la dimensión requerida es de .117" a .133" y la medida de la navaja actual es de .129".

Las piezas después de moldearse (previo al troquelado) están entre .128"-.131" quiere decir que existe variación en las medidas de las piezas moldeadas y aunque las piezas tienen un grado para poder salir del molde que se traduce en una pequeña disminución

de la medida, tienen mayor tamaño que la navaja. Esto genera suficiente presión sobre las aristas de la pieza que se refleja en una gran fractura.

Para mejorar los resultados obtenidos se propone un segundo diseño de experimentos, aplicando el método factorial fraccionado un medio con el fin de agilizar el proceso de optimización y por la complejidad de las mediciones.

Siguiendo con el orden lógico del camino de experimentación y guiándonos con las conclusiones antes vistas derivadas del experimento factorial completo se llega a este nuevo diseño.

**Tabla 3- 14 Diseño experimental (B) derivado de los resultados del primero**

| Orden Est | NAVAJA | RESORTE | ALTURA | TOPE   |
|-----------|--------|---------|--------|--------|
| 3         | 0.129  | ROJO    | 0.5    | -0.008 |
| 2         | 0.132  | VERDE   | 0.5    | -0.008 |
| 4         | 0.132  | ROJO    | 0.5    | -0.012 |
| 1         | 0.129  | VERDE   | 0.5    | -0.012 |
| 8         | 0.132  | ROJO    | 0.9    | -0.008 |
| 6         | 0.132  | VERDE   | 0.9    | -0.012 |
| 7         | 0.129  | ROJO    | 0.9    | -0.012 |
| 5         | 0.129  | VERDE   | 0.9    | -0.008 |

Cuatro factores dos niveles una réplica, se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 3- 15 Resultados del diseño experimental (B)**

| OrdenEst | OrdenCorrida | NAVAJA | RESORTE | ALTURA | TOPE   | RESPUESTA |
|----------|--------------|--------|---------|--------|--------|-----------|
| 3        | 1            | 0.129  | 1       | 0.5    | -0.008 | 0.00995   |
| 2        | 2            | 0.132  | -1      | 0.5    | -0.008 | 0.000525  |
| 4        | 3            | 0.132  | 1       | 0.5    | -0.012 | 0.0009    |
| 1        | 4            | 0.129  | -1      | 0.5    | -0.012 | 0.0099    |
| 8        | 5            | 0.132  | 1       | 0.9    | -0.008 | 0.002075  |
| 6        | 6            | 0.132  | -1      | 0.9    | -0.012 | 0.002875  |
| 7        | 7            | 0.129  | 1       | 0.9    | -0.012 | 0.004525  |
| 5        | 8            | 0.129  | -1      | 0.9    | -0.008 | 0.0074    |

Una vez concluidas las ocho pruebas del diseño de experimentos por la metodología factorial fraccionado un medio mostrado en la tabla 3-14, para los componentes electrónicos, se derivó el análisis estadístico de los datos mostrados en la tabla 3-15. Con la ayuda del software Minitab se obtuvieron los siguientes resultados:

### Optimización de respuesta

Parámetros

|           | Meta   | Inferior | Objetivo | Superior | Ponderación | Importar |
|-----------|--------|----------|----------|----------|-------------|----------|
| RESPUESTA | Mínimo | 0        | 0        | 0.005    | 1           | 1        |

Solución global

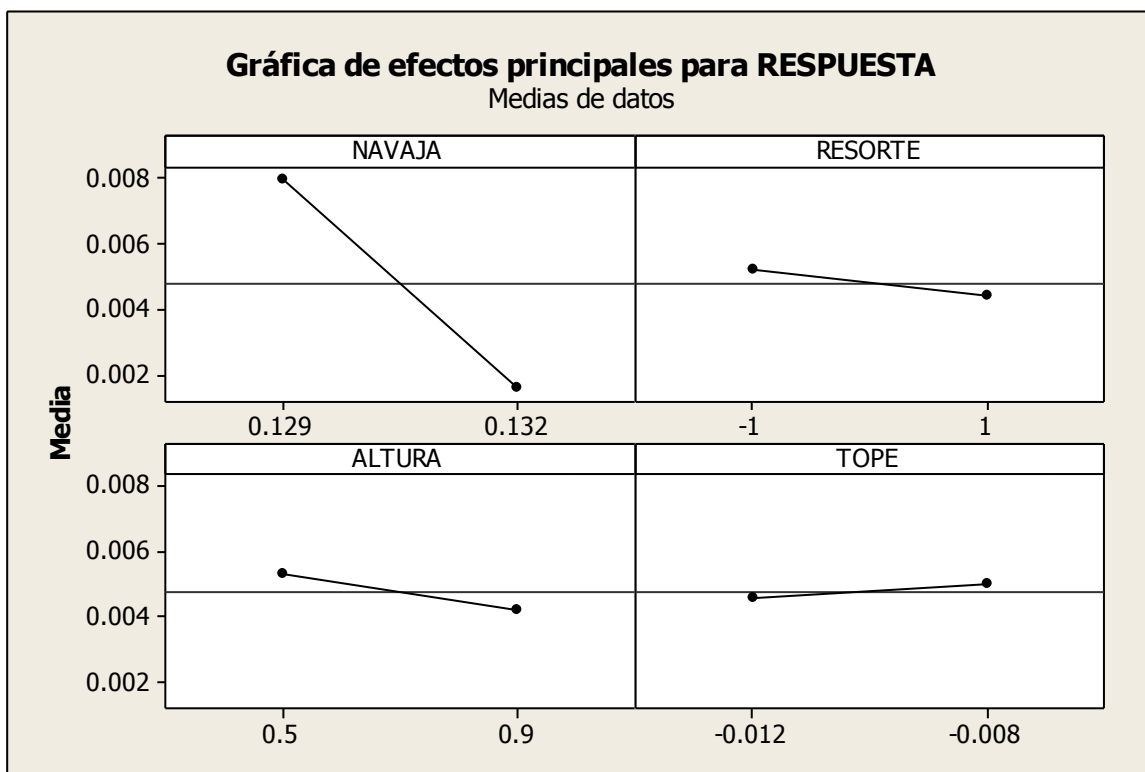
|         |   |        |
|---------|---|--------|
| NAVAJA  | = | 0.132  |
| RESORTE | = | 1      |
| ALTURA  | = | 0.5    |
| TOPE    | = | -0.008 |

Respuestas pronosticadas

RESPUESTA = 0.0003125, deseabilidad = 0.937500

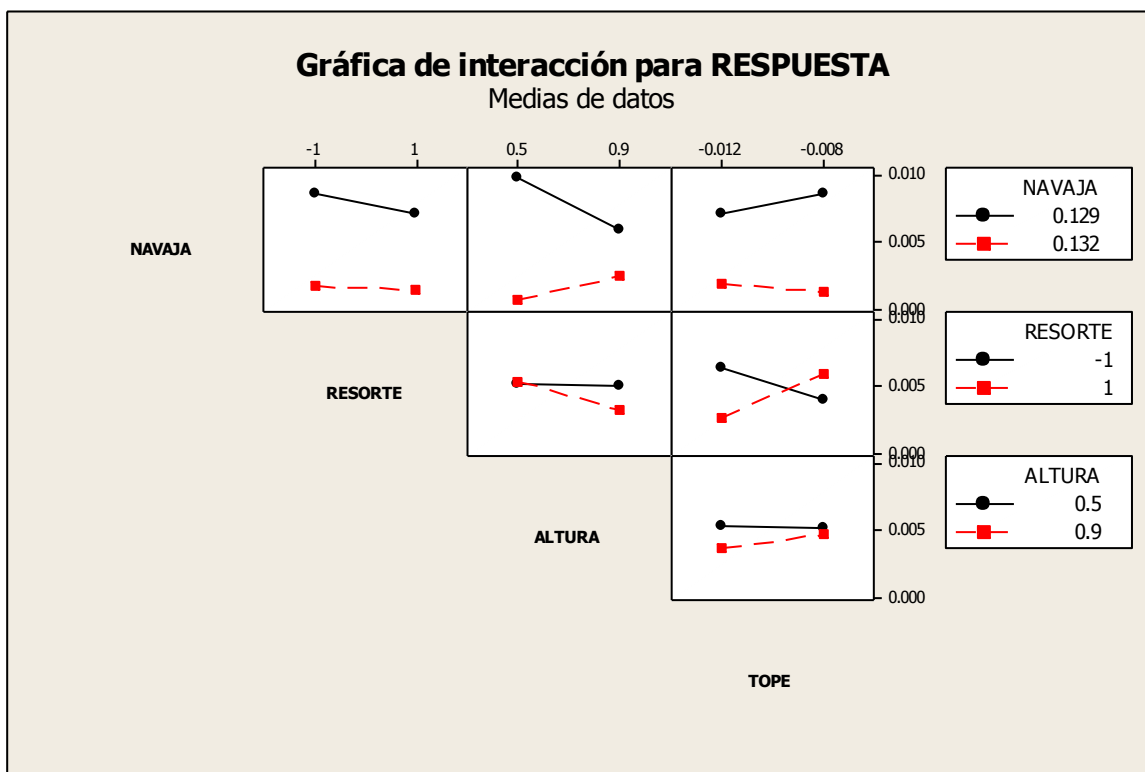
Deseabilidad compuesta = 0.937500

Además arrojo las siguientes gráficas, (haciendo el análisis grafico podemos comprender mejor los resultados).



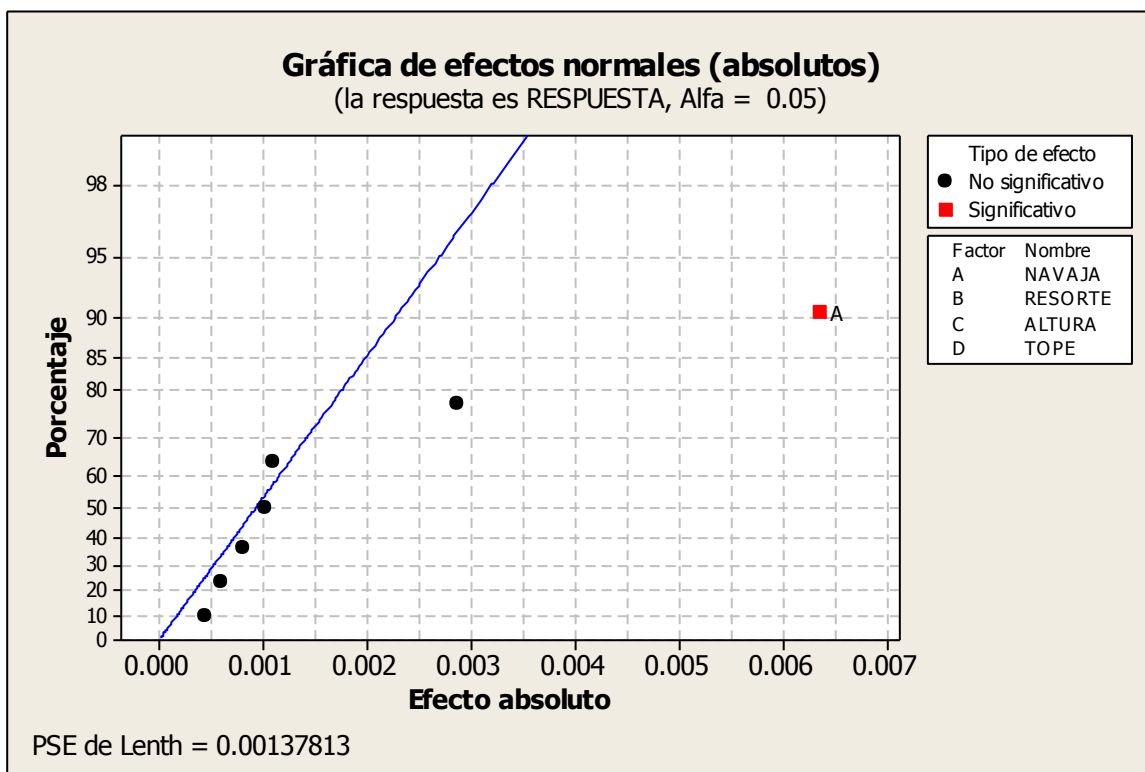
**Gráfica 3. 11 Efectos principales sobre la respuesta**

La gráfica 3.11 destaca el efecto que tiene la navaja sobre la superficie de respuesta. Por el contrario el tope no parece tener mucha influencia en la variable de respuesta.

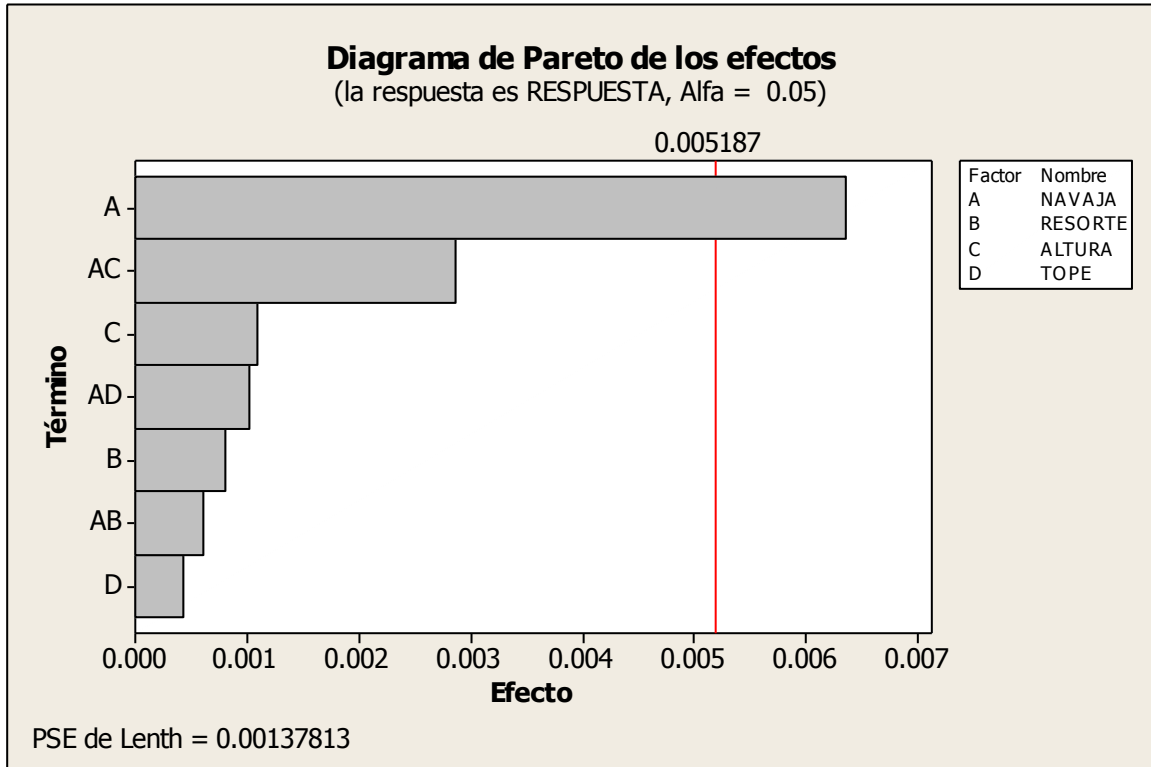


**Gráfica 3. 12 Interacciones de factores para la respuesta**

En la gráfica 3.12 se ve claramente un solo cruce entre el resorte y el tope que genera sospecha estadística de influencia sobre la respuesta dejando claro que trabaja mejor cuando está el resorte en su nivel alto y el tope en su nivel bajo.

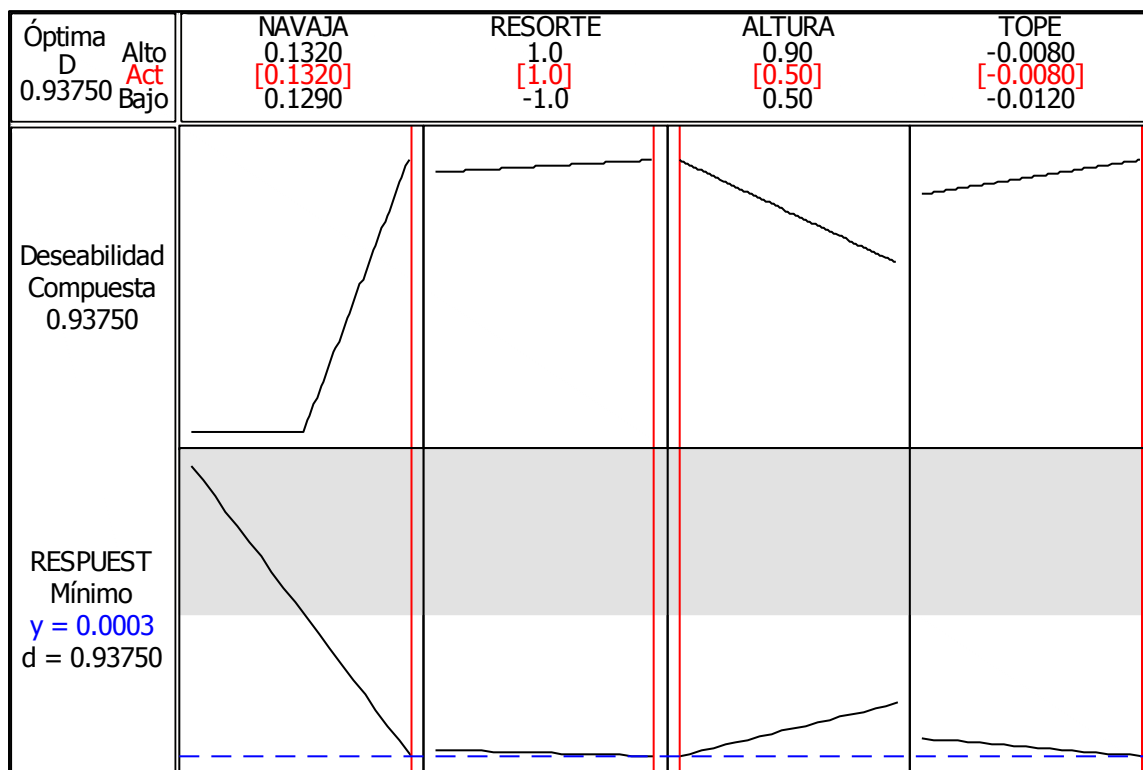


**Gráfica 3. 13 Normal de los efectos significativos**



**Gráfica 3. 14 Pareto de los efectos sobre la respuesta**

Después de analizar las gráficas 3.13 y 3.14 podemos ver que solo un factor es significativo, y afecta nuestra variable de respuesta.



**Gráfica 3. 15 Optimizador de la respuesta**

En conclusión siguiendo la metodología se pudo reducir la media de las fracturas como también su variabilidad (desviación estándar). Respondiendo a los niveles del optimizador mostrados en la gráfica 3.15, se establece la siguiente solución global:

NAVAJA = 0.132  
 RESORTE = 1  
 ALTURA = 0.5  
 TOPE = -0.008

Respuestas pronosticadas

RESPUESTA = 0.0003125

Hasta este punto tenemos los resultados deseados, aunque queda la posibilidad de mejorar el rendimiento al reducir las tolerancias de las dimensiones en el proceso previo, al no aceptar piezas que tengan una medida mayor a .1305" después de moldearse el componente electrónico. Con esto queda concluida la fase de Mejora del proceso de troquelado de componentes electrónicos.

### **3.10 Fase de Control de proceso de corte de componentes electrónicos**

La última fase del modelo DMAIC-DoE que se refiere a la fase de **Controlar**, es donde es necesaria la aplicación directa de herramientas para la mejora de la calidad con el objetivo de estandarizar los parámetros del proceso una vez implementado el modelo en la fase anterior. Para esta actividad se recomienda el uso de herramientas como diagramas de Pareto, gráficos de control por variables o atributos, índices de capacidad de proceso  $C_p$  y  $C_{pk}$ , además este modelo recomienda contemplar la realización de cambios o ajustes al proceso con el objetivo de mantener dentro de especificación la característica de calidad o variable de respuesta establecida al inicio del proyecto con el apoyo de instrucciones de trabajo actualizadas en piso de producción y en el sistema de información que corresponda.

#### **3.10.1 Validación de la experimentación**

Una de las preguntas claves en el planteamiento del problema refiere a los niveles óptimos de operación del proceso de troquelado. Una vez concluida la etapa de Mejora podemos definir estos parámetros, los cuales fueron proyectados con la ayuda del software MINITAB. El optimizador de la respuesta plantea un ajuste idóneo para la operación de troquelado de componentes electrónicos, además de predecir estadísticamente el resultado esperado. En esta fase de Control de la metodología se pretende validar los resultados del diseño de experimentos, para ello se hace recurrente la intervención de la estadística.

La Estadística ha alcanzado un nivel de desarrollo muy alto y constituye actualmente el soporte necesario para todas las ciencias y para la investigación científica, siendo el apoyo para tomar decisiones en un entorno de incertidumbre. Es importante resaltar que las técnicas estadísticas deben usarse apropiadamente para que la información obtenida sea válida [67].

Como parte de la fase de control se realiza la implementación del modelo propuesto y para desarrollar esta etapa de la metodología se tomaron 30 muestras para ser inspeccionadas. Las cuales arrojan 300 datos que se muestran en la tabla 3-16 los cuales sirvieron para analizar la capacidad del proceso. De esta manera podemos inferir si lo propuesto esta aceptable en términos de la calidad del producto.

**Tabla 3- 16 Validación del proceso de troquelado de componentes electrónicos**

| No. Muestra | Dimensiones de la fractura |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | X1                         | X2    | X3    | X4    | X5    | X6    | X7    | X8    | X9    | X10   |
| 1           | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 |
| 2           | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 |
| 3           | 0.003                      | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4           | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5           | 0.000                      | 0.003 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 6           | 0.002                      | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 |
| 7           | 0.000                      | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 8           | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9           | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.003 |
| 10          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 11          | 0.000                      | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 12          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 |
| 13          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 14          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 15          | 0.000                      | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.000 | 0.000 |
| 16          | 0.002                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 17          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.008 |
| 18          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.000 | 0.000 |
| 19          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 21          | 0.008                      | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 22          | 0.000                      | 0.003 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 23          | 0.005                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 24          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.002 |
| 25          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 26          | 0.002                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 27          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 28          | 0.000                      | 0.000 | 0.006 | 0.005 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 29          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.000 | 0.005 | 0.000 | 0.000 |
| 30          | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Una vez concluidas las mediciones de las 300 muestras, se realizó el análisis de estos resultados, utilizando una herramienta de calidad para medir la capacidad del proceso. Las variables de salida o de respuesta de un proceso deben cumplir con ciertas metas y/o especificaciones, a fin de que sea posible considerar que el proceso funciona de

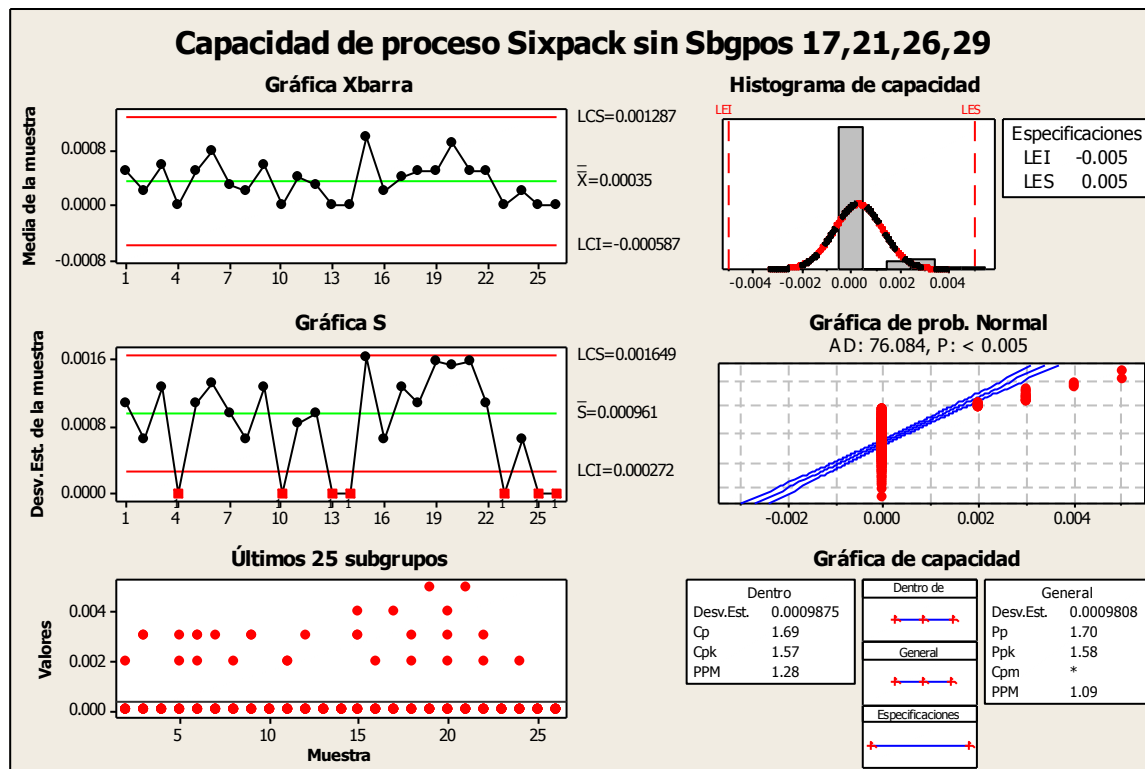
manera satisfactoria. Por ello, una tarea primordial del control de calidad es conocer la capacidad o habilidad de un proceso, que consiste en determinar la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada. Esto permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria [68].

La siguiente gráfica 3.16, es el producto de capacidad seis en uno normal, que se utilizo para examinar los supuestos de un análisis de capacidad normal y evaluar solo los principales índices de capacidad del proceso. Usando este análisis, puede hacer lo siguiente:

- Determinar si el proceso es estable y está bajo control
- Determinar si los datos siguen una distribución normal
- Estimar la capacidad general ( $P_p$ ,  $P_{pk}$ ) y la capacidad potencial ( $C_p$ ,  $C_{pk}$ )

Para realizar el análisis, debe especificar un límite de especificación inferior o superior (o ambos) para definir los requisitos de su proceso. El análisis evalúa la dispersión de los datos del proceso en relación con los límites de especificación. Cuando un proceso es capaz, la dispersión del proceso es menor que la dispersión de especificación. El análisis también puede indicar si el proceso está centrado y si se encuentra en el objetivo. Además, el análisis estima la proporción de productos que no cumplen con las especificaciones [69].

La siguiente gráfica muestra los resultados.



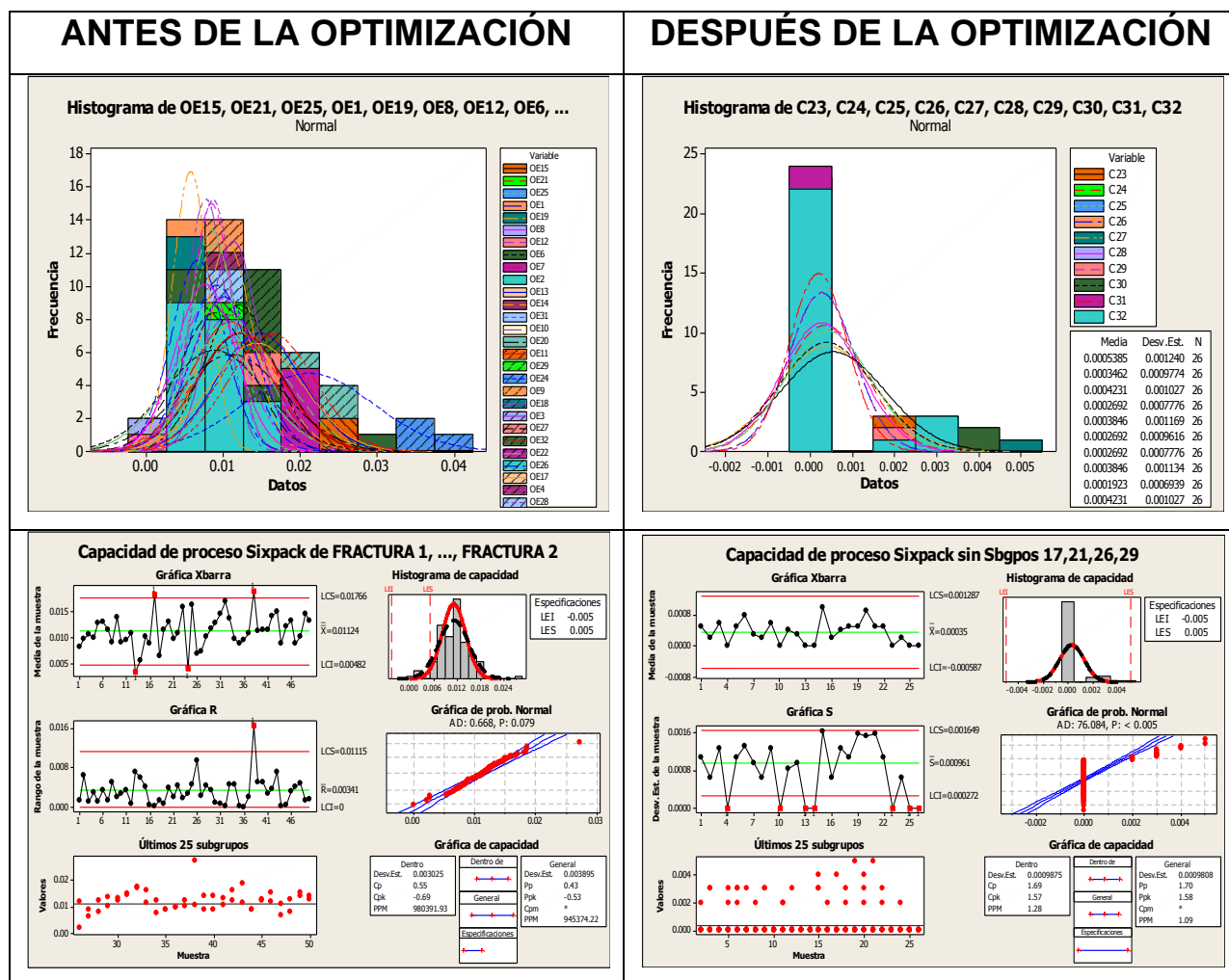
**Gráfica 3. 16 Capacidad de proceso Sixpack**

La gráfica 3.16 nos proporciona datos muy valiosos como el valor de  $C_p$ , que al comparar con la tabla 3-17 nos define la categoría del proceso. En nuestro caso el valor arrojado en la gráfica es de 1.69 lo que concluye que el proceso es de clase 1, decisión adecuada. Con esto podemos concluir la validación del proceso.

**Tabla 3- 17 Interpretación de Valores  $C_p$ .**

| Valor del Índice $C_p$ | Clase o Categoría del Proceso | Decisión   |
|------------------------|-------------------------------|--|
| $C_p \geq 2$           | Clase mundial                 | Se tiene calidad Seis Sigma  |
| $C_p > 1.33$           | 1                             | Adecuado   |
| $1 < C_p < 1.33$       | 2                             | Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto   |
| $0.67 < C_p < 1$       | 3                             | No adecuado para el trabajo. Es necesario un análisis del proceso. Requiere de modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria |
| $C_p < 0.67$           | 4                             | No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias   |

Para apreciar la diferencia existente entre los procesos, el actual del pasado, mostraremos la gráfica 3. 17 cuatro en uno, además de la tabla 3-18.



Gráfica 3. 17 Comparación de procesos

Tabla 3- 18 Análisis del antes y después de la optimización.

| Antes  | Después   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• La Gráfica Xbarra muestra límites inferior y superior muy amplios, esto deja en evidencia la variabilidad del proceso (.013”).</li> <li>• El histograma muestra una distribución normal fuera de los límites requeridos.</li> <li>• La Gráfica de últimos 25 subgrupos muestran la mayor concentración</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• La Gráfica Xbarra muestra límites inferior y superior muy estrechos, esto deja en evidencia la poca variabilidad del proceso (.0007”).</li> <li>• La media de los datos resultado de .0003” muy por debajo del máximo permitido.</li> <li>• El histograma muestra una distribución normal dentro de los</li> </ul> |

|  |   |
|--|---|
| <p>de grupos por encima de la media de .010”</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El valor de Cp de .55 lo categoriza como nivel 4, es decir No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias</li> </ul> | <p>límites requeridos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La Gráfica de últimos 25 subgrupos muestran la mayor concentración de grupos en cero, sin fractura.</li> <li>• El valor de Cp de 1.69 lo categoriza como nivel 1, es decir adecuado para el trabajo.</li> </ul> |
|--|---|

### 3.10.2 Instrucciones de trabajo

La secuencia de operación más segura y eficiente que debe ser documentada y requiere ser aprendida y repetida para lograr altos estándares de calidad, productividad y el entusiasmo del cliente. La estandarización es el soporte del cambio en el proceso de llevar a la organización a convertirse en una empresa de clase mundial [70].

Las *instrucciones de trabajo* muestran la secuencia lógica para la realización de cierta actividad, por lo cual es necesario contemplar los siguientes pasos:

#### 1. Prepare al trabajador.

- ❖ Ponga a las personas en un ambiente tranquilo.
- ❖ Indíqueles las actividades a realizar
- ❖ Encuentre si alguna de las personas conoce la actividad
- ❖ Encuentre a la persona interesada en aprender la actividad
- ❖ Ponga a la persona en la posición donde pueda ver y oír las instrucciones.

#### 2. Presente la operación

- ❖ Diga, muestre e ilustre un paso de la operación a la vez.
- ❖ Vuélvalo a hacer, haciendo énfasis en los puntos importantes.
- ❖ Sea claro, paciente, no de más información de la que las personas puedan manejar en ese momento.

#### 3. Pruebe el desempeño

- ❖ Deje que las personas hagan la actividad, corrija errores.
- ❖ Haga que la persona explique cada paso importante cuando esté haciendo la

- ❖ actividad.
- ❖ El siguiente paso es que la persona explique cada punto de la actividad cuando la esté realizando.
- ❖ Asegúrese que la persona entiende.
- ❖ Continúe hasta que usted (instructor), conozca que la persona conoce.

#### **4. Seguimiento**

- ❖ Ponga a la persona en su propio trabajo.
- ❖ Designe a la persona que va a ir a ayudar, si se necesita.
- ❖ Revise a la persona frecuentemente.
- ❖ Anime a su gente para que haga preguntas.
- ❖ Disminuya el entrenamiento y aumente el seguimiento. [71]

Las instrucciones de trabajo que se tienen actualmente están estandarizadas con el procedimiento identificado internamente como **M9-A-14**, este lleva por título “*CORTAR PUERTAS DE MOLDEO Y TERMINALES*”. Este cuenta con diversos cambios, siendo la última revisión la “**J**” con fecha de aprobación del 8 de septiembre del año 2017. Cabe mencionar que el procedimiento no cuenta con las instrucciones previas al troquelado, específicamente al corte de la puerta de moldeo, también no hace referencia a otro procedimiento referente a la limpieza de los componentes electrónicos que se lleva a cabo con un proceso de chorro abrasivo (sandblast). Esta última revisión no se encuentra traducida al idioma español y no está en la base de datos que está al alcance del personal de producción. A continuación se transcribe el procedimiento con revisión “**H**”, aprobado el 5 de diciembre de 2016, este último se encuentra en una base de datos que está al alcance del personal involucrado, pero carece de imágenes como ayudas visuales.

**1.0 Propósito.** Describir el procedimiento para quitar el exceso de la puerta de moldeo y material de “Lead frame” después de moldeo.

**2.0 Procedimiento.**

**2.1 Corte de material de Puerta de Moldeo.**

- 2.1.1 Usando el “fixture” cortador MTF-26000/34000 y 50000 para todas las series de partes y tipos de “Lead Frame”
- 2.1.2 Coloque el “Lead Frame” boca arriba en el “fixture” con el material de puerta de moldeo excesiva debajo de la navaja. Alinee el borde del envuelto de moldeo con el borde de la navaja.
- 2.1.3 Presione firmemente sobre el sostenedor de navaja cargada de resorte para cortar la puerta de moldeo.
- 2.1.4 Visualmente inspeccione el producto para asegurar un corte limpio. Repita si es necesario.
- 2.1.5 Continúe hasta que todo el material excesivo de puerta de moldeo sea cortado.

**2.2 Seleccione el dado de corte.**

- 2.2.1 El dado de corte consiste de dos secciones: Porción baja fija y porción alta movable, bajo aire comprimido. La selección del dado de corte está basada en el tipo de “Lead Frame” y requerimiento para “Tabs”.
- 2.2.2 El dado de corte es el bloque soporte cargado sobre el cual las partes descansan. La selección del dado de corte está basado en el número de series.
- 2.2.3 Escoja de acuerdo a la tabla I.

| Dado de corte |          |          | Opciones de Corte del Dado |    |    |
|---------------|----------|----------|----------------------------|----|----|
| MTD-26000-045 | Múltiple | Con Tabs | 26                         | 27 | 30 |
| MTD-26000     | Múltiple | Sin Tabs | 26                         | 27 | 30 |
| MTD-33000-045 | Múltiple | Con Tabs | 33                         | 34 |    |
| MTD-33000     | Múltiple | Sin Tabs | 33                         | 34 |    |
| MTD-50000-045 | Múltiple | Con Tabs | 50                         |    |    |
| MTD-50000     | Múltiple | Sin Tabs | 50                         |    |    |
| MTD-30000-072 | Múltiple | Sin Tabs | Solo Allied Signal         |    |    |

|               |       |          |    |  |  |
|---------------|-------|----------|----|--|--|
| PTD-29000-045 | Único | Con Tabs | 29 |  |  |
| PTD-29000     | Único | Sin Tabs | 29 |  |  |
| PTD-31000-045 | Único | Con Tabs | 31 |  |  |
| PTD-31000     | Único | Sin Tabs | 31 |  |  |

Tabla I

2.2.4 El personal carga el dado y lo inserta sobre el “fixture”.

### 2.3 Cortando material de “Lead Frame”.

2.3.1 Encienda el equipo.

2.3.2 Ponga la presión en el mínimo requerido para proveer un corte limpio. Marco de terminal único: Nom= 70 psi [Rango: 60-80 psi]. Marco de terminal múltiple: Nom= 80 psi [Rango: 60-100 psi]. Marco de Allied Signal: Nom= 20 psi [Rango: 20-40 psi].

2.3.3 Coloque el marco de terminal en la cavidad de inserción, sobre postes guías con envoltura de moldeo boca abajo.

2.3.4 Presione ambos botones para activar. Precaución: el dado de corte esta bajo presión. Se debe tener cuidado de mantener el área baja del dado limpia.

2.3.5 Libere ambos botones cuando el corte este completo.

2.3.6 Quite el material de “Lead Frame” excesivo y producto cortado. Limpie el dado si es necesario: usando brocha o pinzas de pico.

2.3.7 Corte una muestra de 10 piezas y mándese a Control de Calidad para inspección de acuerdo a los requerimientos de **M9-Q-05**.

2.3.8 Si la muestra es aceptable, complete el lote de acuerdo al párrafo 2.2.3 a 2.3.6.

2.3.8.1 si la muestra no es aceptable, confirme la correcta: presión, dado que está siendo usado y que el dado este en buena condición física.

2.3.9 Si ocurren algunos problemas, consulte con el supervisor o QA.

2.3.10 Cuando este completo llene el traveler y mandese al siguiente proceso.

Hasta aquí concluye el procedimiento **M9-A-14**.

Para dejar en evidencia las oportunidades de mejora en el proceso de troquelado, previo a la implementación de las nuevas instrucciones de trabajo y procesamiento se plantean estas preguntas sobre la organización de puesto de trabajo.

- ✓ ¿Qué cosas no son necesarias tener a mano?
  - ✓ ¿Qué objetos suelen recibir más de un nombre por parte de mis compañeros?
  - ✓ ¿Qué cosas se necesitarían para mantener la línea siempre limpia?
  - ✓ ¿Cómo se mejoraría si aumentase el grado de limpieza de la línea de producción?
  - ✓ ¿Qué tipo de carteles, avisos, advertencias o procedimientos faltan?
  - ✓ ¿El lugar de trabajo es motivador y confortable?
  - ✓ ¿Son necesarios los desplazamientos para acceder a las técnicas?
  - ✓ ¿Las piezas, componentes o materiales son fáciles de coger?
  - ✓ ¿Dónde están localizadas las piezas rechazadas y en qué cantidades?
  - ✓ ¿Todos los productos o materiales están identificados?
  - ✓ ¿Se puede decir que hay un lugar para cada cosa y cada cosa está en su lugar?
- [72]

### 3.10.3 Estandarización del nuevo método de trabajo

Continuando con la fase de **Control** de la metodología propuesta, se implementara la siguiente instrucción de trabajo, tomando como base el procedimiento antes visto.

1.0 **Propósito.** Describir el procedimiento para quitar el exceso de la puerta de moldeo y material de “Lead frame” después de moldeo.

#### 2.0 Procedimiento.

2.1. Corte de material de Puerta de Moldeo.

2.1.1. Usando el “fixture” cortador identificado como: **“CORTE DE PUERTA MOLDEO”** MTF-26000/34000 y 50000 para todas las series de partes y tipos de “Lead Frame”



2.1.2. Coloque el “Lead Frame” boca arriba en el “fixture” con el material de puerta de moldeo excesiva debajo de la navaja. Alinee el borde del encapsulado con el borde de la navaja.

2.1.3. Baje la prensa y presione firmemente para cortar la puerta de moldeo.



2.1.4. Continúe con el procedimiento de limpieza **MWI-75-18** (Únicamente la sección 2.0 –Sandblast-).

2.1.5. Visualmente inspeccione el producto para asegurar un corte limpio. Repita si es necesario.

2.1.6. Continúe hasta que todo el material excesivo de puerta de moldeo sea cortado.

2.2. Seleccione el dado de corte.

2.2.1. El dado de corte consiste de dos secciones: Porción baja fija y porción alta movable (base y tapa). La selección del dado de corte está basada en el tipo de “Lead Frame” y requerimiento para “Tabs”.

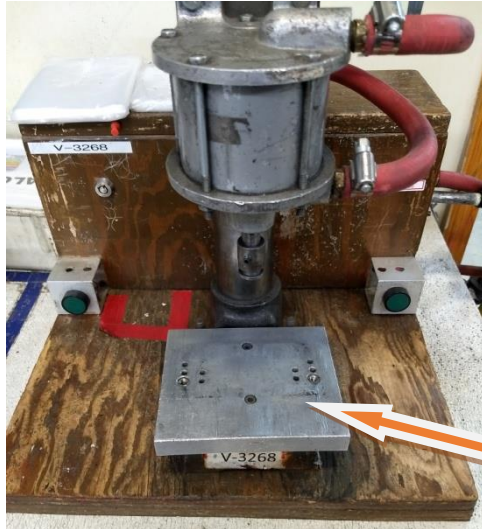
2.2.2. Entre los dos bloques que componen la matriz del dado de corte se encuentra el botador y sobre este las partes descansan. La selección del dado de corte está basado en el número de series.

2.2.3. Escoja de acuerdo a la tabla I.

| Dado de corte |          |          | Opciones de Corte del Dado |    |    |
|---------------|----------|----------|----------------------------|----|----|
| MTD-26000-045 | Múltiple | Con Tabs | 26                         | 27 | 30 |
| MTD-26000     | Múltiple | Sin Tabs | 26                         | 27 | 30 |
| MTD-33000-045 | Múltiple | Con Tabs | 33                         | 34 |    |
| MTD-33000     | Múltiple | Sin Tabs | 33                         | 34 |    |
| MTD-50000-045 | Múltiple | Con Tabs | 50                         |    |    |
| MTD-50000     | Múltiple | Sin Tabs | 50                         |    |    |
| MTD-30000-072 | Múltiple | Sin Tabs | Solo Allied Signal         |    |    |
| PTD-29000-045 | Único    | Con Tabs | 29                         |    |    |
| PTD-29000     | Único    | Sin Tabs | 29                         |    |    |
| PTD-31000-045 | Único    | Con Tabs | 31                         |    |    |
| PTD-31000     | Único    | Sin Tabs | 31                         |    |    |

Tabla I

2.2.4. El personal carga el dado y lo inserta sobre el “fixture” (Base de aluminio de la prensa neumática).



**Base de aluminio**

2.3. Cortando material de “Lead Frame”.

2.3.1. Encienda el equipo.

2.3.2. Ponga la presión en el mínimo requerido para proveer un corte limpio. Marco de terminal único: Nom= 60 psi [Rango: 60-80 psi]. Marco de **terminal múltiple: Nom= 70 psi** [Rango: 60-100 psi]. Marco de Allied Signal: Nom= 20 psi [Rango: 20-40 psi].



- 2.3.2.1. Para “marco de terminal múltiple” utilice la “fixture” **Block Gauge .500** entre la matriz y el punzón, esto determina la distancia entre la base y la tapa del dado de corte.



- 2.3.3. Coloque el marco de terminal en la cavidad de inserción, sobre postes guías con el encapsulado de moldeo boca abajo.



- 2.3.4. Presione ambos botones para activar. Precaución: el dado de corte esta bajo presión. Se debe tener cuidado de mantener el área baja del dado limpia.



- 2.3.5. Libere ambos botones cuando el corte este completo.
- 2.3.6. Quite el material de “Lead Frame” excesivo y producto cortado. Limpie el dado si es necesario: usando brocha o pinzas de pico.
- 2.3.7. Corte una muestra de 10 piezas y mándese a control de calidad para inspección de acuerdo a los requerimientos de **M9-Q-05**.
- 2.3.8. Si la muestra es aceptable, complete el lote de acuerdo al párrafo **2.2.3 a 2.3.6**.
- 2.3.8.1. Si la muestra no es aceptable, confirme la correcta: presión, dado que está siendo usado y que el dado este en buena condición física y con los parámetros establecidos de acuerdo al número de parte.
- 2.3.9. Si ocurren algunos problemas, consulte con el supervisor o Q.A.
- 2.3.10. Cuando este completo llene el traveler y mándese al siguiente proceso.

El modelo propuesto requiere la validación del mismo, sin embargo esto no significa que las funciones aquí concluyan, más bien es un aprendizaje infinito en la filosofía de la mejora continua.

## Conclusiones

La Metodología propuesta DMAIC-DoE desarrollada en este trabajo de investigación, deja en evidencia la eficacia de los resultados obtenidos en la optimización del proceso de corte por troquelado de componentes electrónicos. Al término de las pruebas

experimentales, una vez concluido el análisis estadístico de los datos a través de la metodología factorial  $2^k$  de diseño de experimentos, se llegó a la conclusión que el ángulo de la navaja es significativo, sin embargo se descarto debido a que tuvo su mejor respuesta trabajando a cero grados, es decir que no hay necesidad de aumentar los grados de la navaja. El factor de presión no resulto ser significativo por sí solo, pero combinado con otros factores si lo fue, por lo tanto descartamos este efecto y decidimos manejarlo como constante, siguiendo el parámetro recomendado por el optimizador de la respuesta, quedando en 70 psi. Entre la altura y el tope se tuvieron sospechas debido a que el optimizador recomendó lo contrario de lo que se analizó en las gráficas de los efectos principales. No obstante la respuesta, que en este caso de estudio fue el tamaño de la fractura, resulto fuera de especificaciones y se encontro ligeramente por encima de los estándares de calidad del producto.

Para mejorar los resultados obtenidos se realizo un segundo diseño de experimentos, aplicando el método factorial fraccionado un medio con el fin de cumplir con los estándares de calidad del producto. Siguiendo con el orden lógico del camino de experimentación y guiándonos con las conclusiones antes vistas derivadas del experimento factorial completo, se realizaron ocho pruebas. El análisis estadístico de los datos, mostro que se pudo reducir la media de las fracturas como también su variabilidad. Respondiendo a los niveles del optimizador, se establecieron los siguientes parámetros para el Dado de corte resultando de la siguiente manera:

Espesor de la Navaja de .132”

Utilizar los Resortes del botador Verde

La Altura entre el punzón y la matriz debe ser igual a .500”

El Traslape entre el punzón y la matriz debe ser igual a .008”

Con estos parámetros la fractura pronosticada por el optimizador de la respuesta fue de .0003”, lo cual está muy por debajo de la máxima permitida que es de .005”.

Estando evaluado el escenario óptimo propuesto, se llegó a la reducción de un 95% en defectos de fracturas en los componentes electrónicos, además de incrementar los

estándares de producción para los procesos posteriores, lo cual da como resultado un incremento de las ganancias diarias.

- En las operaciones de visual el tiempo de operación bajo de 1.45 minutos a 29 segundos
- En las operaciones de parche el tiempo de operación se redujo de 2 minutos a 37 segundos.
- Se pudieron liberar dos operadores por celda de producción.
- La empresa cuenta con cuatro celdas para la producción de inductores.
- El ahorro anual por ocho operadores es de 594,544 pesos, sin embargo desde otra perspectiva estos se emplean para incrementar la productividad dentro de la empresa, empleándose en nuevos proyectos.
- Aproximadamente las ganancias por operador son de 20 dólares por hora, lo que suma un total de 414,770 dólares anuales.

Como parte de los objetivos específicos definidos desde el inicio de esta investigación y dando respuesta al compromiso de generar nuevo conocimiento, se desarrolló como parte de los entregables de esta tesis, una metodología para la optimización de procesos de corte por troquelado dentro de la industria del ramo electrónico, la cual tiene su fundamento en la metodología de Seis Sigma DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve and Control) pero integrando nuevas fases de gran relevancia para los proyectos de mejora y que se contemplan en esta metodología como son las fases de Planear, Estudio Preliminar y Experimentación. Con esta metodología se busca una correcta y adecuada implementación para la mejora de procesos enfocados principalmente en procesos de troquelado de componentes electrónicos, sin embargo, no está limitado para poder replicarlo a otro tipo de procesos productivos.

## **Recomendaciones y trabajo futuro**

Como parte de las recomendaciones y trabajo futuro se consideró lo siguiente:

- Una parte fundamental para lograr con éxito un proyecto de investigación es tener una buena planeación antes de realizar cualquier experimentación.
- Este tipo de experimentación se puede replicar a otros números de partes que lleven procesos de troquelado.

- Se recomienda contar con un equipo sólido y con fundamentos suficientes en estadística y calidad para avanzar de forma significativa en la investigación.
- Transferir el control a los proveedores de entrada (mantenimiento, recursos humanos, ingeniería).
- Está la posibilidad de mejorar el rendimiento al reducir las tolerancias de las dimensiones en el proceso previo, al no aceptar piezas que tengan una medida mayor a .1305" después de moldearse el componente electrónico.
- Está la posibilidad de mejorar el rendimiento al remplazar la placa de moldeo en el proceso previo al troquelado, debido al desgaste y dimensiones que actualmente tienen.

## Referencias

- [1] "Nuestro Estado -Gobierno del Estado de Baja California." [Online]. Available: [http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro\\_estado/municipios/mexicali/sector\\_prod.jsp](http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/mexicali/sector_prod.jsp).
- [2] "Electrónica - Invest in Baja." [Online]. Available: <http://www.investinbaja.gob.mx/es/industrias/electronica>.
- [3] "Electrónica Vanguard, S.A. de C.V. - Empleo Nuevo." [Online]. Available: <https://www.empleonuevo.com/organizacion/485>.
- [4] "Company | Vanguard Electronics." [Online]. Available: <https://ve1.com/company/#aboutus>.
- [5] Z. Z. Fang, M. C. Koopman, and H. Wang, "1.04 – Cemented Tungsten Carbide Hardmetal-An Introduction," in *Comprehensive Hard Materials*, 2014, pp. 123–137.
- [6] D. Montgomery, "Diseño y análisis de experimentos," *Limusa Wiley*. pp. 21–692, 2004.
- [7] M. P. . Groover, *Fundamentos de manufactura modernamateriales, procesos y sistemas / .*
- [8] J. Rodríguez Montes, L. Castro Martínez, and J. C. del. Real Romero, *Procesos industriales para materiales no metálicos*. Vision Net, 2006.
- [9] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, and Espinoza Limón Jaime, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educacion, 2008.
- [10] "¿Qué es el Desarrollo Sustentable? | Sustentabilidad." [Online]. Available: <http://sds.uanl.mx/el-concepto-desarrollo-sustentable/>. [Accessed: 04-Dec-2018].

- [11] Universidad Mayor de San Simón, “3.3. Trabajado Metálico de Láminas,” *Procesos de Láminas*, pp. 200–208, 2015.
- [12] D. C. Montgomery, J. Bert Keats, L. A. Perry, J. R. Thompson, and W. S. Messina, “Using statistically designed experiments for process development and improvement: an application in electronics manufacturing,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 16, no. 1, pp. 55–63, 2000.
- [13] D. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*. 2009.
- [14] I. Mukherjee and P. K. Ray, “A review of optimization techniques in metal cutting processes,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 50, no. 1, pp. 15–34, 2006.
- [15] P. M. Horton and J. M. Allwood, “Yield improvement opportunities for manufacturing automotive sheet metal components,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 249, no. June, pp. 78–88, 2017.
- [16] C. Yuangyai and H. B. Nembhard, “Chapter 8 – Design of experiments: A key to innovation in nanotechnology,” in *Emerging Nanotechnologies for Manufacturing*, 2015, pp. 230–254.
- [17] S. Thipprakmas, “Application of Taguchi technique to investigation of geometry and position of V-ring indenter in fine-blanking process,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 5, pp. 2496–2500, 2010.
- [18] C. . Cheung, W. . Lee, and W. . Chiu, “An investigation of tool wear in the dam-bar cutting of integrated circuit packages,” *Wear*, vol. 237, no. 2, pp. 274–282, 2000.
- [19] J. Xu, B. Guo, C. Wang, and D. Shan, “Blanking clearance and grain size effects on micro deformation behavior and fracture in micro-blanking of brass foil,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 60, pp. 27–34, 2012.
- [20] M. Geiger, F. Vollertsen, and R. Kals, “Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Microparts,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 277–282, 1996.
- [21] E. Al-momani and I. Rawabdeh, “An Application of Finite Element Method and Design of Experiments in the Optimization of Sheet Metal Blanking Process,” *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 53–63, 2008.
- [22] I. Wadi and R. Balendra, “An intelligent approach to monitor and control the blanking process,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 30, no. 2, pp. 85–92, 1999.
- [23] S. . Maiti, A. . Ambekar, U. . Singh, P. . Date, and K. Narasimhan, “Assessment of influence of some process parameters on sheet metal blanking,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 249–256, 2000.
- [24] R. H. Andruet, D. A. Dillard, and S. M. Holzer, “Two- and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 21, no. 1, pp. 17–34, 2001.

- [25] R. Hambli, S. Richir, P. Crubleau, and B. Taravel, "Prediction of optimum clearance in sheet metal blanking processes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 22, no. 1–2, pp. 20–25, Sep. 2003.
- [26] R. B. Lahoti, "Optimisation of Blanking Parameters for Aisi 1018 and Aisi 202 Steel Sheets Using Anfis," vol. 1, no. 7, pp. 187–192, 2014.
- [27] Y. A. Báez, J. Limón, D. A. Tlapa, and M. A. Rodríguez, "Aplicación de seis sigma y los métodos taguchi para el incremento de la resistencia a la prueba de jalón de un diodo emisor de luz," *Inf. Tecnol.*, vol. 21, no. 1, pp. 63–76, 2010.
- [28] M. Tanco, E. Viles, L. Ilzarbe, and M. J. Álvarez, "Manufacturing Industries Need Design of Experiments ( DoE )," *Manuscr. Submitt. March*, vol. 20, pp. 1108–1113, 2007.
- [29] "Electrónico | PROMEXICO | Gobierno | gob.mx." [Online]. Available: <http://www.gob.mx/promexico/acciones-y-programas/electronico>. [Accessed: 14-Apr-2017].
- [30] U. D. E. I. De, "INDUSTRIA ELECTRÓNICA Índice," *PRO MÉXICO*, 2014.
- [31] "Identifican clústeres clave en Baja California | EL EMPRESARIO." [Online]. Available: <http://elempresario.mx/actualidad/industria-electronica-mayor-relevancia-economica-tijuana>. [Accessed: 14-Apr-2017].
- [32] UMSS, "Troquelado de Metales," *Fac. ciencias y Tecnol.*, vol. III, no. UMSS, p. 15.
- [33] C. M. Villar, "Troqueles y Troquelado ," *Met. actual*, vol. 12, p. 8, 2009.
- [34] L. Antonio, M. Carreño, A. A. Martínez, L. A. Raúl, D. Aguilera, and M. C. Ramírez, "DISEÑO DE TROQUEL PARA EL PROCESO DE CORTE FINO USANDO," pp. 183–192, 2012.
- [35] Generalidades, "Trabajo En Fr{[í]}O De Los Metales."
- [36] C. Simples, "Capitulo Iii," pp. 36–40.
- [37] "A mis padres : Rebeca López Marure Miguel Angel Archundia Gutiérrez A mi hermano :"
- [38] Autor, "Herramientas para la mejora continua," 2015.
- [39] T. Pyzdek, *The Six Sigma handbook*. 2003.
- [40] R. Schroeder, "Six sigma," vol. 22, no. 11, 2000.
- [41] McGraw-Hill, Ed., *The six sigma way*. .
- [42] G. Electric and S. Sigma, "Metodología dmaic," pp. 14–16.
- [43] D. Monzón and D. Monzón Paiva, "Introducción al diseño de experimentos," *Rev. la Fac. Agron. la Univ. Cent. Venez.*, no. Alcance 34, p. 167 p., 1992.

- [44] J. Antony and J. Antony, "11 – Design of Experiments and its Role Within Six Sigma," in *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, 2014, pp. 201–208.
- [45] "INSTRUMENTOS de medición," *Pdf*, vol. 1, no. 5663, pp. 1–6, 2012.
- [46] "Estéreo-microscopio para laboratorio." [Online]. Available: <http://www.adendorf.net/estereo-microscopio-para-laboratorio-p-684.html>. [Accessed: 15-Apr-2017].
- [47] "Sistema de medición de visión CNC con funcionalidad avanzada : Modern Machine Shop México." [Online]. Available: [http://www.mms-mexico.com/productos/vision-measuring-system-with-interchangeable-lenses\(2\)](http://www.mms-mexico.com/productos/vision-measuring-system-with-interchangeable-lenses(2)). [Accessed: 29-Apr-2017].
- [48] "Que es ISO 9001?" [Online]. Available: <http://www.normas9000.com/que-es-iso-9000.html>. [Accessed: 29-Apr-2017].
- [49] "Comenzando con Serie AS9100 Aeroespacial| BSI Group." [Online]. Available: <https://www.bsigroup.com/es-MX/serie-AS9100-aeroespacial/comenzando-AS9100-aeroespacial/>. [Accessed: 29-Apr-2017].
- [50] S. Mil-std-, "DEPARTMENT OF DEFENSE Design , Manufacturing and Quality Standards for Custom Electromagnetic," no. July 2010, 1992.
- [51] D. K. I. V. Victorica, "Capítulo I. Estado del arte 1.1," Universidad Autónoma de Baja California.
- [52] "Basic Facts about Inductors [Lesson 1] Overview of inductors - &quot;How do inductors work?&quot; | Murata Manufacturing Co., Ltd." [Online]. Available: <http://www.murata.com/en-us/products/emiconfun/inductor/2010/12/15/en-20101215-p1>. [Accessed: 29-Apr-2017].
- [53] "Basic Facts about Inductors [Lesson 2] Roles of Inductors 1- &quot;Inductors for high-frequency range&quot; | Murata Manufacturing Co., Ltd." [Online]. Available: <http://www.murata.com/en-us/products/emiconfun/inductor/2011/03/14/en-20110314-p1>. [Accessed: 29-Apr-2017].
- [54] "Product | Vanguard Electronics." [Online]. Available: <https://ve1.com/products/product/?search=34000 Series>. [Accessed: 29-Apr-2017].
- [55] A. Delgado, "Cómo definir y mapear procesos," 2016.
- [56] "SIPOC – Mapa de proceso a alto nivel | 6 Sigma, Lean y Kaizen." [Online]. Available: <http://www.caletec.com/blog/otros/sipoc-mapa-de-proceso-a-alto-nivel/>. [Accessed: 30-Apr-2017].
- [57] "Diagrama de Pareto - Herramientas de la Calidad - Aiteco Consultores Aiteco Consultores." [Online]. Available: <https://www.aiteco.com/diagrama-de-pareto/>. [Accessed: 30-Apr-2017].

- [58] “¿Qué es un estudio R&R del sistema de medición (repetibilidad y reproducibilidad)?” [Online]. Available: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/quality-tools/measurement-system-analysis/gage-r-r-analyses/what-is-a-gage-r-r-study/>. [Accessed: 01-May-2017].
- [59] “Ejemplo de cómo obtener e interpretar un valor p.” [Online]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/example-of-getting-and-interpreting-a-p-value/>. [Accessed: 09-Dec-2017].
- [60] “Histogramas y normalidad de los datos | 6 Sigma, Lean y Kaizen.” [Online]. Available: <http://www.caletec.com/blog/6sigma/histogramas-y-normalidad-de-los-datos/>. [Accessed: 30-Apr-2017].
- [61] “¿Qué es una gráfica de dispersión?” [Online]. Available: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/graphs/graphs-of-pairs-of-variables/scatterplots/scatterplot/>. [Accessed: 30-Apr-2017].
- [62] “Comercializadora Industrial de Resortes.” [Online]. Available: [http://www.cideresortes.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=9&Itemid=11](http://www.cideresortes.com/index.php?option=com_content&view=article&id=9&Itemid=11). [Accessed: 16-May-2017].
- [63] “Diseños factoriales.” [Online]. Available: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/factorial-designs/factorial-designs/>. [Accessed: 01-May-2017].
- [64] “Diseños factoriales y factoriales fraccionados.”
- [65] J. Ferré and F. X. Rius, “Introducción al diseño estadístico de experimentos,” *Técnicas Lab.*, vol. 274, pp. 648–653, 2002.
- [66] H. A. L. A. Medida, “Resortes de catálogo & hechos a la medida 2015,” 2015.
- [67] M. R. Spiegel, J. Schiller, and R. A. Srinivasan, *Probabilidad y Estadística*. 2001.
- [68] Humberto Gutierrez Pulido; Roman De La Vara Salazar, *Control estadístico de calidad y seis sigma*. 2009.
- [69] “Revisión general de Análisis de capacidad Seis en uno normal.”
- [70] M. Angel and U. Tinoco, “Aprendizajes de manufactura esbelta para futuros ingenieros industriales,” pp. 1–11.
- [71] W. J. Morgan, “Job Instruction,” vol. 58, no. 1, p. 156, 1945.
- [72] S. Todd, *Lean Manufacturing*, no. March. 2014.

## Anexos

Diseño experimental "A":

### Ajuste factorial: RESPUESTA vs. Altura (pulgadas), Resorte,...

Efectos y coeficientes estimados para RESPUESTA (unidades codificadas)

| Término                            | Efecto    | Coef      |
|------------------------------------|-----------|-----------|
| Constante                          |           | 0.010752  |
| Altura (pulgadas)                  | -0.000703 | -0.000352 |
| Resorte                            | 0.000269  | 0.000134  |
| Ángulo                             | 0.002481  | 0.001241  |
| Presión                            | -0.000097 | -0.000048 |
| Tope (pulgadas)                    | 0.000706  | 0.000353  |
| Altura (pulgadas)*Resorte          | 0.001994  | 0.000997  |
| Altura (pulgadas)*Ángulo           | -0.000200 | -0.000100 |
| Altura (pulgadas)*Presión          | -0.000341 | -0.000170 |
| Altura (pulgadas)*Tope (pulgadas)  | 0.002119  | 0.001059  |
| Resorte*Ángulo                     | -0.000122 | -0.000061 |
| Resorte*Presión                    | -0.000075 | -0.000038 |
| Resorte*Tope (pulgadas)            | 0.000541  | 0.000270  |
| Ángulo*Presión                     | -0.000419 | -0.000209 |
| Ángulo*Tope (pulgadas)             | 0.000622  | 0.000311  |
| Presión*Tope (pulgadas)            | -0.001350 | -0.000675 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Ángulo   | 0.001016  | 0.000508  |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Presión  | -0.000925 | -0.000462 |
| Altura (pulgadas)*Ángulo*Presión   | -0.000062 | -0.000031 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*         | 0.001872  | 0.000936  |
| Tope (pulgadas)                    |           |           |
| Altura (pulgadas)*Ángulo*          | 0.001322  | 0.000661  |
| Tope (pulgadas)                    |           |           |
| Altura (pulgadas)*Presión*         | -0.000463 | -0.000231 |
| Tope (pulgadas)                    |           |           |
| Resorte*Ángulo*Presión             | -0.000528 | -0.000264 |
| Resorte*Ángulo*Tope (pulgadas)     | 0.002500  | 0.001250  |
| Resorte*Presión*Tope (pulgadas)    | -0.000297 | -0.000148 |
| Ángulo*Presión*Tope (pulgadas)     | -0.000072 | -0.000036 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Ángulo*  | 0.000034  | 0.000017  |
| Presión                            |           |           |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Ángulo*  | 0.000131  | 0.000066  |
| Tope (pulgadas)                    |           |           |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Presión* | -0.001153 | -0.000577 |
| Tope (pulgadas)                    |           |           |
| Altura (pulgadas)*Ángulo*Presión*  | -0.000947 | -0.000473 |
| Tope (pulgadas)                    |           |           |
| Resorte*Ángulo*Presión*            | -0.000713 | -0.000356 |
| Tope (pulgadas)                    |           |           |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Ángulo*  | 0.001356  | 0.000678  |
| Presión*Tope (pulgadas)            |           |           |

Medias de cuadrado mínimo para RESPUESTA

|                   | Media    |
|-------------------|----------|
| Altura (pulgadas) |          |
| 0.4000            | 0.011103 |
| 0.8000            | 0.010400 |
| Resorte           |          |
| VERDE             | 0.010617 |
| ROJO              | 0.010886 |
| Ángulo            |          |

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| 0.0000                            | 0.009511 |
| 0.0600                            | 0.011992 |
| Presión                           |          |
| 70                                | 0.010800 |
| 90                                | 0.010703 |
| Tope (pulgadas)                   |          |
| -0.0100                           | 0.010398 |
| -0.0050                           | 0.011105 |
| Altura (pulgadas)*Resorte         |          |
| 0.4000 VERDE                      | 0.011966 |
| 0.8000 VERDE                      | 0.009269 |
| 0.4000 ROJO                       | 0.010241 |
| 0.8000 ROJO                       | 0.011531 |
| Altura (pulgadas)*Ángulo          |          |
| 0.4000 0.0000                     | 0.009763 |
| 0.8000 0.0000                     | 0.009259 |
| 0.4000 0.0600                     | 0.012444 |
| 0.8000 0.0600                     | 0.011541 |
| Altura (pulgadas)*Presión         |          |
| 0.4000 70                         | 0.010981 |
| 0.8000 70                         | 0.010619 |
| 0.4000 90                         | 0.011225 |
| 0.8000 90                         | 0.010181 |
| Altura (pulgadas)*Tope (pulgadas) |          |
| 0.4000 -0.0100                    | 0.011809 |
| 0.8000 -0.0100                    | 0.008988 |
| 0.4000 -0.0050                    | 0.010397 |
| 0.8000 -0.0050                    | 0.011813 |
| Resorte*Ángulo                    |          |
| VERDE 0.0000                      | 0.009316 |
| ROJO 0.0000                       | 0.009706 |
| VERDE 0.0600                      | 0.011919 |
| ROJO 0.0600                       | 0.012066 |
| Resorte*Presión                   |          |
| VERDE 70                          | 0.010628 |
| ROJO 70                           | 0.010972 |
| VERDE 90                          | 0.010606 |
| ROJO 90                           | 0.010800 |
| Resorte*Tope (pulgadas)           |          |
| VERDE -0.0100                     | 0.010534 |
| ROJO -0.0100                      | 0.010263 |
| VERDE -0.0050                     | 0.010700 |
| ROJO -0.0050                      | 0.011509 |
| Ángulo*Presión                    |          |
| 0.0000 70                         | 0.009350 |
| 0.0600 70                         | 0.012250 |
| 0.0000 90                         | 0.009672 |
| 0.0600 90                         | 0.011734 |
| Ángulo*Tope (pulgadas)            |          |
| 0.0000 -0.0100                    | 0.009469 |
| 0.0600 -0.0100                    | 0.011328 |
| 0.0000 -0.0050                    | 0.009553 |
| 0.0600 -0.0050                    | 0.012656 |
| Presión*Tope (pulgadas)           |          |
| 70 -0.0100                        | 0.009772 |
| 90 -0.0100                        | 0.011025 |
| 70 -0.0050                        | 0.011828 |
| 90 -0.0050                        | 0.010381 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Ángulo  |          |
| 0.4000 VERDE 0.0000               | 0.010056 |
| 0.8000 VERDE 0.0000               | 0.008575 |
| 0.4000 ROJO 0.0000                | 0.009469 |
| 0.8000 ROJO 0.0000                | 0.009944 |

|   |          |
|---|----------|
| 0.4000 VERDE 0.0600                       | 0.013875 |
| 0.8000 VERDE 0.0600                       | 0.009963 |
| 0.4000 ROJO 0.0600                        | 0.011013 |
| 0.8000 ROJO 0.0600                        | 0.013119 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Presión         |          |
| 0.4000 VERDE 70                           | 0.012269 |
| 0.8000 VERDE 70                           | 0.008988 |
| 0.4000 ROJO 70                            | 0.009694 |
| 0.8000 ROJO 70                            | 0.012250 |
| 0.4000 VERDE 90                           | 0.011663 |
| 0.8000 VERDE 90                           | 0.009550 |
| 0.4000 ROJO 90                            | 0.010788 |
| 0.8000 ROJO 90                            | 0.010813 |
| Altura (pulgadas)*Ángulo*Presión          |          |
| 0.4000 0.0000 70                          | 0.009463 |
| 0.8000 0.0000 70                          | 0.009238 |
| 0.4000 0.0600 70                          | 0.012500 |
| 0.8000 0.0600 70                          | 0.012000 |
| 0.4000 0.0000 90                          | 0.010063 |
| 0.8000 0.0000 90                          | 0.009281 |
| 0.4000 0.0600 90                          | 0.012388 |
| 0.8000 0.0600 90                          | 0.011081 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Tope (pulgadas) |          |
| 0.4000 VERDE -0.0100                      | 0.012006 |
| 0.8000 VERDE -0.0100                      | 0.009063 |
| 0.4000 ROJO -0.0100                       | 0.011613 |
| 0.8000 ROJO -0.0100                       | 0.008913 |
| 0.4000 VERDE -0.0050                      | 0.011925 |
| 0.8000 VERDE -0.0050                      | 0.009475 |
| 0.4000 ROJO -0.0050                       | 0.008869 |
| 0.8000 ROJO -0.0050                       | 0.014150 |
| Altura (pulgadas)*Ángulo*Tope (pulgadas)  |          |
| 0.4000 0.0000 -0.0100                     | 0.010119 |
| 0.8000 0.0000 -0.0100                     | 0.008819 |
| 0.4000 0.0600 -0.0100                     | 0.013500 |
| 0.8000 0.0600 -0.0100                     | 0.009156 |
| 0.4000 0.0000 -0.0050                     | 0.009406 |
| 0.8000 0.0000 -0.0050                     | 0.009700 |
| 0.4000 0.0600 -0.0050                     | 0.011388 |
| 0.8000 0.0600 -0.0050                     | 0.013925 |
| Altura (pulgadas)*Presión*Tope (pulgadas) |          |
| 0.4000 70 -0.0100                         | 0.011244 |
| 0.8000 70 -0.0100                         | 0.008300 |
| 0.4000 90 -0.0100                         | 0.012375 |
| 0.8000 90 -0.0100                         | 0.009675 |
| 0.4000 70 -0.0050                         | 0.010719 |
| 0.8000 70 -0.0050                         | 0.012938 |
| 0.4000 90 -0.0050                         | 0.010075 |
| 0.8000 90 -0.0050                         | 0.010688 |
| Resorte*Ángulo*Presión                    |          |
| VERDE 0.0000 70                           | 0.009381 |
| ROJO 0.0000 70                            | 0.009319 |
| VERDE 0.0600 70                           | 0.011875 |
| ROJO 0.0600 70                            | 0.012625 |
| VERDE 0.0000 90                           | 0.009250 |
| ROJO 0.0000 90                            | 0.010094 |
| VERDE 0.0600 90                           | 0.011963 |
| ROJO 0.0600 90                            | 0.011506 |
| Resorte*Ángulo*Tope (pulgadas)            |          |
| VERDE 0.0000 -0.0100                      | 0.008294 |
| ROJO 0.0000 -0.0100                       | 0.010644 |
| VERDE 0.0600 -0.0100                      | 0.012775 |
| ROJO 0.0600 -0.0100                       | 0.009881 |

|   |          |
|---|----------|
| VERDE 0.0000 -0.0050                              | 0.010338 |
| ROJO 0.0000 -0.0050                               | 0.008769 |
| VERDE 0.0600 -0.0050                              | 0.011063 |
| ROJO 0.0600 -0.0050                               | 0.014250 |
| Resorte*Presión*Tope (pulgadas)                   |          |
| VERDE 70 -0.0100                                  | 0.010019 |
| ROJO 70 -0.0100                                   | 0.009525 |
| VERDE 90 -0.0100                                  | 0.011050 |
| ROJO 90 -0.0100                                   | 0.011000 |
| VERDE 70 -0.0050                                  | 0.011238 |
| ROJO 70 -0.0050                                   | 0.012419 |
| VERDE 90 -0.0050                                  | 0.010163 |
| ROJO 90 -0.0050                                   | 0.010600 |
| Ángulo*Presión*Tope (pulgadas)                    |          |
| 0.0000 70 -0.0100                                 | 0.008669 |
| 0.0600 70 -0.0100                                 | 0.010875 |
| 0.0000 90 -0.0100                                 | 0.010269 |
| 0.0600 90 -0.0100                                 | 0.011781 |
| 0.0000 70 -0.0050                                 | 0.010031 |
| 0.0600 70 -0.0050                                 | 0.013625 |
| 0.0000 90 -0.0050                                 | 0.009075 |
| 0.0600 90 -0.0050                                 | 0.011688 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Ángulo*Presión          |          |
| 0.4000 VERDE 0.0000 70                            | 0.010463 |
| 0.8000 VERDE 0.0000 70                            | 0.008300 |
| 0.4000 ROJO 0.0000 70                             | 0.008463 |
| 0.8000 ROJO 0.0000 70                             | 0.010175 |
| 0.4000 VERDE 0.0600 70                            | 0.014075 |
| 0.8000 VERDE 0.0600 70                            | 0.009675 |
| 0.4000 ROJO 0.0600 70                             | 0.010925 |
| 0.8000 ROJO 0.0600 70                             | 0.014325 |
| 0.4000 VERDE 0.0000 90                            | 0.009650 |
| 0.8000 VERDE 0.0000 90                            | 0.008850 |
| 0.4000 ROJO 0.0000 90                             | 0.010475 |
| 0.8000 ROJO 0.0000 90                             | 0.009713 |
| 0.4000 VERDE 0.0600 90                            | 0.013675 |
| 0.8000 VERDE 0.0600 90                            | 0.010250 |
| 0.4000 ROJO 0.0600 90                             | 0.011100 |
| 0.8000 ROJO 0.0600 90                             | 0.011913 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Ángulo*Tope (pulgadas)  |          |
| 0.4000 VERDE 0.0000 -0.0100                       | 0.008563 |
| 0.8000 VERDE 0.0000 -0.0100                       | 0.008025 |
| 0.4000 ROJO 0.0000 -0.0100                        | 0.011675 |
| 0.8000 ROJO 0.0000 -0.0100                        | 0.009613 |
| 0.4000 VERDE 0.0600 -0.0100                       | 0.015450 |
| 0.8000 VERDE 0.0600 -0.0100                       | 0.010100 |
| 0.4000 ROJO 0.0600 -0.0100                        | 0.011550 |
| 0.8000 ROJO 0.0600 -0.0100                        | 0.008213 |
| 0.4000 VERDE 0.0000 -0.0050                       | 0.011550 |
| 0.8000 VERDE 0.0000 -0.0050                       | 0.009125 |
| 0.4000 ROJO 0.0000 -0.0050                        | 0.007263 |
| 0.8000 ROJO 0.0000 -0.0050                        | 0.010275 |
| 0.4000 VERDE 0.0600 -0.0050                       | 0.012300 |
| 0.8000 VERDE 0.0600 -0.0050                       | 0.009825 |
| 0.4000 ROJO 0.0600 -0.0050                        | 0.010475 |
| 0.8000 ROJO 0.0600 -0.0050                        | 0.018025 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Presión*Tope (pulgadas) |          |
| 0.4000 VERDE 70 -0.0100                           | 0.011438 |
| 0.8000 VERDE 70 -0.0100                           | 0.008600 |
| 0.4000 ROJO 70 -0.0100                            | 0.011050 |
| 0.8000 ROJO 70 -0.0100                            | 0.008000 |
| 0.4000 VERDE 90 -0.0100                           | 0.012575 |
| 0.8000 VERDE 90 -0.0100                           | 0.009525 |

|  |        |        |         |         |          |
|--|--------|--------|---------|---------|----------|
| 0.4000   | ROJO   | 90     | -0.0100 |         | 0.012175 |
| 0.8000   | ROJO   | 90     | -0.0100 |         | 0.009825 |
| 0.4000   | VERDE  | 70     | -0.0050 |         | 0.013100 |
| 0.8000   | VERDE  | 70     | -0.0050 |         | 0.009375 |
| 0.4000   | ROJO   | 70     | -0.0050 |         | 0.008338 |
| 0.8000   | ROJO   | 70     | -0.0050 |         | 0.016500 |
| 0.4000   | VERDE  | 90     | -0.0050 |         | 0.010750 |
| 0.8000   | VERDE  | 90     | -0.0050 |         | 0.009575 |
| 0.4000   | ROJO   | 90     | -0.0050 |         | 0.009400 |
| 0.8000   | ROJO   | 90     | -0.0050 |         | 0.011800 |
| Altura (pulgadas)*Ángulo*Presión*Tope (pulgadas)         |        |        |         |         |          |
| 0.4000   | 0.0000 | 70     | -0.0100 |         | 0.008938 |
| 0.8000   | 0.0000 | 70     | -0.0100 |         | 0.008400 |
| 0.4000   | 0.0600 | 70     | -0.0100 |         | 0.013550 |
| 0.8000   | 0.0600 | 70     | -0.0100 |         | 0.008200 |
| 0.4000   | 0.0000 | 90     | -0.0100 |         | 0.011300 |
| 0.8000   | 0.0000 | 90     | -0.0100 |         | 0.009238 |
| 0.4000   | 0.0600 | 90     | -0.0100 |         | 0.013450 |
| 0.8000   | 0.0600 | 90     | -0.0100 |         | 0.010113 |
| 0.4000   | 0.0000 | 70     | -0.0050 |         | 0.009988 |
| 0.8000   | 0.0000 | 70     | -0.0050 |         | 0.010075 |
| 0.4000   | 0.0600 | 70     | -0.0050 |         | 0.011450 |
| 0.8000   | 0.0600 | 70     | -0.0050 |         | 0.015800 |
| 0.4000   | 0.0000 | 90     | -0.0050 |         | 0.008825 |
| 0.8000   | 0.0000 | 90     | -0.0050 |         | 0.009325 |
| 0.4000   | 0.0600 | 90     | -0.0050 |         | 0.011325 |
| 0.8000   | 0.0600 | 90     | -0.0050 |         | 0.012050 |
| Resorte*Ángulo*Presión*Tope (pulgadas)                   |        |        |         |         |          |
| VERDE  | 0.0000 | 70     | -0.0100 |         | 0.007513 |
| ROJO   | 0.0000 | 70     | -0.0100 |         | 0.009825 |
| VERDE  | 0.0600 | 70     | -0.0100 |         | 0.012525 |
| ROJO   | 0.0600 | 70     | -0.0100 |         | 0.009225 |
| VERDE  | 0.0000 | 90     | -0.0100 |         | 0.009075 |
| ROJO   | 0.0000 | 90     | -0.0100 |         | 0.011463 |
| VERDE  | 0.0600 | 90     | -0.0100 |         | 0.013025 |
| ROJO   | 0.0600 | 90     | -0.0100 |         | 0.010538 |
| VERDE  | 0.0000 | 70     | -0.0050 |         | 0.011250 |
| ROJO   | 0.0000 | 70     | -0.0050 |         | 0.008813 |
| VERDE  | 0.0600 | 70     | -0.0050 |         | 0.011225 |
| ROJO   | 0.0600 | 70     | -0.0050 |         | 0.016025 |
| VERDE  | 0.0000 | 90     | -0.0050 |         | 0.009425 |
| ROJO   | 0.0000 | 90     | -0.0050 |         | 0.008725 |
| VERDE  | 0.0600 | 90     | -0.0050 |         | 0.010900 |
| ROJO   | 0.0600 | 90     | -0.0050 |         | 0.012475 |
| Altura (pulgadas)*Resorte*Ángulo*Presión*Tope (pulgadas) |        |        |         |         |          |
| 0.4000   | VERDE  | 0.0000 | 70      | -0.0100 | 0.006625 |
| 0.8000   | VERDE  | 0.0000 | 70      | -0.0100 | 0.008400 |
| 0.4000   | ROJO   | 0.0000 | 70      | -0.0100 | 0.011250 |
| 0.8000   | ROJO   | 0.0000 | 70      | -0.0100 | 0.008400 |
| 0.4000   | VERDE  | 0.0600 | 70      | -0.0100 | 0.016250 |
| 0.8000   | VERDE  | 0.0600 | 70      | -0.0100 | 0.008800 |
| 0.4000   | ROJO   | 0.0600 | 70      | -0.0100 | 0.010850 |
| 0.8000   | ROJO   | 0.0600 | 70      | -0.0100 | 0.007600 |
| 0.4000   | VERDE  | 0.0000 | 90      | -0.0100 | 0.010500 |
| 0.8000   | VERDE  | 0.0000 | 90      | -0.0100 | 0.007650 |
| 0.4000   | ROJO   | 0.0000 | 90      | -0.0100 | 0.012100 |
| 0.8000   | ROJO   | 0.0000 | 90      | -0.0100 | 0.010825 |
| 0.4000   | VERDE  | 0.0600 | 90      | -0.0100 | 0.014650 |
| 0.8000   | VERDE  | 0.0600 | 90      | -0.0100 | 0.011400 |
| 0.4000   | ROJO   | 0.0600 | 90      | -0.0100 | 0.012250 |
| 0.8000   | ROJO   | 0.0600 | 90      | -0.0100 | 0.008825 |
| 0.4000   | VERDE  | 0.0000 | 70      | -0.0050 | 0.014300 |
| 0.8000   | VERDE  | 0.0000 | 70      | -0.0050 | 0.008200 |

|        |       |        |    |         |          |
|--------|-------|--------|----|---------|----------|
| 0.4000 | ROJO  | 0.0000 | 70 | -0.0050 | 0.005675 |
| 0.8000 | ROJO  | 0.0000 | 70 | -0.0050 | 0.011950 |
| 0.4000 | VERDE | 0.0600 | 70 | -0.0050 | 0.011900 |
| 0.8000 | VERDE | 0.0600 | 70 | -0.0050 | 0.010550 |
| 0.4000 | ROJO  | 0.0600 | 70 | -0.0050 | 0.011000 |
| 0.8000 | ROJO  | 0.0600 | 70 | -0.0050 | 0.021050 |
| 0.4000 | VERDE | 0.0000 | 90 | -0.0050 | 0.008800 |
| 0.8000 | VERDE | 0.0000 | 90 | -0.0050 | 0.010050 |
| 0.4000 | ROJO  | 0.0000 | 90 | -0.0050 | 0.008850 |
| 0.8000 | ROJO  | 0.0000 | 90 | -0.0050 | 0.008600 |
| 0.4000 | VERDE | 0.0600 | 90 | -0.0050 | 0.012700 |
| 0.8000 | VERDE | 0.0600 | 90 | -0.0050 | 0.009100 |
| 0.4000 | ROJO  | 0.0600 | 90 | -0.0050 | 0.009950 |
| 0.8000 | ROJO  | 0.0600 | 90 | -0.0050 | 0.015000 |

## Diseño experimental "B"

### Ajuste factorial: RESPUESTA vs. NAVAJA, RESORTE, ALTURA, TOPE

Efectos y coeficientes estimados para RESPUESTA (unidades codificadas)

| Término        | Efecto    | Coef      |
|----------------|-----------|-----------|
| Constante      |           | 0.004769  |
| NAVAJA         | -0.006350 | -0.003175 |
| RESORTE        | -0.000812 | -0.000406 |
| ALTURA         | -0.001100 | -0.000550 |
| TOPE           | 0.000438  | 0.000219  |
| NAVAJA*RESORTE | 0.000600  | 0.000300  |
| NAVAJA*ALTURA  | 0.002862  | 0.001431  |
| NAVAJA*TOPE    | -0.001025 | -0.000513 |

S = \* PRESS = \*

Análisis de varianza para RESPUESTA (unidades codificadas)

| Fuente                   | GL | SC Sec.    | SC Ajust.  | MC Ajust.  | F | P |
|--------------------------|----|------------|------------|------------|---|---|
| Efectos principales      | 4  | 0.00008477 | 0.00008477 | 0.00002119 | * | * |
| NAVAJA                   | 1  | 0.00008065 | 0.00008065 | 0.00008065 | * | * |
| RESORTE                  | 1  | 0.00000132 | 0.00000132 | 0.00000132 | * | * |
| ALTURA                   | 1  | 0.00000242 | 0.00000242 | 0.00000242 | * | * |
| TOPE                     | 1  | 0.00000038 | 0.00000038 | 0.00000038 | * | * |
| 2° orden (interacciones) | 3  | 0.00001921 | 0.00001921 | 0.00000640 | * | * |
| NAVAJA*RESORTE           | 1  | 0.00000072 | 0.00000072 | 0.00000072 | * | * |
| NAVAJA*ALTURA            | 1  | 0.00001639 | 0.00001639 | 0.00001639 | * | * |
| NAVAJA*TOPE              | 1  | 0.00000210 | 0.00000210 | 0.00000210 | * | * |
| Error residual           | 0  | *          | *          | *          |   |   |
| Total                    | 7  | 0.00010398 |            |            |   |   |

Medias de cuadrado mínimo para RESPUESTA

|         | Media    |
|---------|----------|
| NAVAJA  |          |
| 0.1290  | 0.007944 |
| 0.1320  | 0.001594 |
| RESORTE |          |
| -1      | 0.005175 |

|                |         |          |
|----------------|---------|----------|
| 1              |         | 0.004363 |
| ALTURA         |         |          |
| 0.5000         |         | 0.005319 |
| 0.9000         |         | 0.004219 |
| TOPE           |         |          |
| -0.0120        |         | 0.004550 |
| -0.0080        |         | 0.004988 |
| NAVAJA*RESORTE |         |          |
| 0.1290         | -1      | 0.008650 |
| 0.1320         | -1      | 0.001700 |
| 0.1290         | 1       | 0.007238 |
| 0.1320         | 1       | 0.001488 |
| NAVAJA*ALTURA  |         |          |
| 0.1290         | 0.5000  | 0.009925 |
| 0.1320         | 0.5000  | 0.000713 |
| 0.1290         | 0.9000  | 0.005963 |
| 0.1320         | 0.9000  | 0.002475 |
| NAVAJA*TOPE    |         |          |
| 0.1290         | -0.0120 | 0.007213 |
| 0.1320         | -0.0120 | 0.001888 |
| 0.1290         | -0.0080 | 0.008675 |
| 0.1320         | -0.0080 | 0.001300 |

A continuación se plantean algunos diferentes tipos de diseños e experimentos como preliminares para el desarrollo del mismo.

***Propuesta uno:***

Diseño factorial (completo).

Factores: 4    Diseño de la base:    4, 16

Corridas: 16    Réplicas:    1

Bloques: 1    Puntos centrales (total): 0

Tabla del diseño experimental uno

| OrdenEst | Orden<br>Corrida | PtCentral | Bloques | Altura | Presión | Ángulo | Resorte | Respuesta |
|----------|------------------|-----------|---------|--------|---------|--------|---------|-----------|
| 15       | 1                | 1         | 1       | 1.25   | 80      | 0.06   | Rojo    |           |
| 5        | 2                | 1         | 1       | 1.25   | 60      | 0.06   | Verde   |           |
| 8        | 3                | 1         | 1       | 1.4    | 80      | 0.06   | Verde   |           |
| 1        | 4                | 1         | 1       | 1.25   | 60      | 0      | Verde   |           |
| 16       | 5                | 1         | 1       | 1.4    | 80      | 0.06   | Rojo    |           |
| 10       | 6                | 1         | 1       | 1.4    | 60      | 0      | Rojo    |           |
| 6        | 7                | 1         | 1       | 1.4    | 60      | 0.06   | Verde   |           |
| 11       | 8                | 1         | 1       | 1.25   | 80      | 0      | Rojo    |           |
| 13       | 9                | 1         | 1       | 1.25   | 60      | 0.06   | Rojo    |           |
| 14       | 10               | 1         | 1       | 1.4    | 60      | 0.06   | Rojo    |           |
| 2        | 11               | 1         | 1       | 1.4    | 60      | 0      | Verde   |           |
| 7        | 12               | 1         | 1       | 1.25   | 80      | 0.06   | Verde   |           |
| 3        | 13               | 1         | 1       | 1.25   | 80      | 0      | Verde   |           |
| 4        | 14               | 1         | 1       | 1.4    | 80      | 0      | Verde   |           |
| 12       | 15               | 1         | 1       | 1.4    | 80      | 0      | Rojo    |           |
| 9        | 16               | 1         | 1       | 1.25   | 60      | 0      | Rojo    |           |

**Propuesta dos:**

Diseño factorial (completo).

Factores: 5    Diseño de la base:    5, 32

Corridas: 32    Réplicas:    1

Bloques: 1    Puntos centrales (total):    0

Tabla del diseño experimental dos:

| OrdenEst | Orden<br>Corrida | PtCentral | Bloques | Altura | Resorte | Ángulo | Presión | Tope   | Respuesta |
|----------|------------------|-----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|-----------|
| 15       | 1                | 1         | 1       | 1.25   | ROJO    | 0.06   | 80      | -0.01  |           |
| 21       | 2                | 1         | 1       | 1.25   | VERDE   | 0.06   | 60      | -0.005 |           |
| 25       | 3                | 1         | 1       | 1.25   | VERDE   | 0      | 80      | -0.005 |           |
| 1        | 4                | 1         | 1       | 1.25   | VERDE   | 0      | 60      | -0.01  |           |
| 19       | 5                | 1         | 1       | 1.25   | ROJO    | 0      | 60      | -0.005 |           |
| 8        | 6                | 1         | 1       | 1.4    | ROJO    | 0.06   | 60      | -0.01  |           |
| 12       | 7                | 1         | 1       | 1.4    | ROJO    | 0      | 80      | -0.01  |           |
| 6        | 8                | 1         | 1       | 1.4    | VERDE   | 0.06   | 60      | -0.01  |           |
| 7        | 9                | 1         | 1       | 1.25   | ROJO    | 0.06   | 60      | -0.01  |           |
| 2        | 10               | 1         | 1       | 1.4    | VERDE   | 0      | 60      | -0.01  |           |
| 13       | 11               | 1         | 1       | 1.25   | VERDE   | 0.06   | 80      | -0.01  |           |
| 14       | 12               | 1         | 1       | 1.4    | VERDE   | 0.06   | 80      | -0.01  |           |
| 31       | 13               | 1         | 1       | 1.25   | ROJO    | 0.06   | 80      | -0.005 |           |
| 10       | 14               | 1         | 1       | 1.4    | VERDE   | 0      | 80      | -0.01  |           |
| 20       | 15               | 1         | 1       | 1.4    | ROJO    | 0      | 60      | -0.005 |           |
| 11       | 16               | 1         | 1       | 1.25   | ROJO    | 0      | 80      | -0.01  |           |
| 29       | 17               | 1         | 1       | 1.25   | VERDE   | 0.06   | 80      | -0.005 |           |
| 24       | 18               | 1         | 1       | 1.4    | ROJO    | 0.06   | 60      | -0.005 |           |
| 9        | 19               | 1         | 1       | 1.25   | VERDE   | 0      | 80      | -0.01  |           |
| 18       | 20               | 1         | 1       | 1.4    | VERDE   | 0      | 60      | -0.005 |           |
| 3        | 21               | 1         | 1       | 1.25   | ROJO    | 0      | 60      | -0.01  |           |
| 27       | 22               | 1         | 1       | 1.25   | ROJO    | 0      | 80      | -0.005 |           |
| 32       | 23               | 1         | 1       | 1.4    | ROJO    | 0.06   | 80      | -0.005 |           |
| 22       | 24               | 1         | 1       | 1.4    | VERDE   | 0.06   | 60      | -0.005 |           |
| 26       | 25               | 1         | 1       | 1.4    | VERDE   | 0      | 80      | -0.005 |           |
| 17       | 26               | 1         | 1       | 1.25   | VERDE   | 0      | 60      | -0.005 |           |
| 4        | 27               | 1         | 1       | 1.4    | ROJO    | 0      | 60      | -0.01  |           |
| 28       | 28               | 1         | 1       | 1.4    | ROJO    | 0      | 80      | -0.005 |           |
| 23       | 29               | 1         | 1       | 1.25   | ROJO    | 0.06   | 60      | -0.005 |           |
| 5        | 30               | 1         | 1       | 1.25   | VERDE   | 0.06   | 60      | -0.01  |           |
| 16       | 31               | 1         | 1       | 1.4    | ROJO    | 0.06   | 80      | -0.01  |           |
| 30       | 32               | 1         | 1       | 1.4    | VERDE   | 0.06   | 80      | -0.005 |           |

Una tercera propuesta seria con más de una réplica.

Diseño factorial (fraccionado).

Factores: 5 Diseño de la base: 5, 8 Resolución: III

Corridas: 16 Réplicas: 2 Fracción: 1/4

Bloques: 1 Puntos centrales (total): 0

Tabla del diseño experimental tres.

| OrdenEst | Orden<br>Corrida | PtCentral | Bloques | Tope   | Resorte | Ángulo | Altura | Presión | Respuesta |
|----------|------------------|-----------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|-----------|
| 2        | 1                | 1         | 1       | -0.005 | Rojo    | 0      | 1.25   | 65      |           |
| 7        | 2                | 1         | 1       | -0.01  | Verde   | 1      | 1.25   | 65      |           |
| 3        | 3                | 1         | 1       | -0.01  | Verde   | 0      | 1.25   | 80      |           |
| 11       | 4                | 1         | 1       | -0.01  | Verde   | 0      | 1.25   | 80      |           |
| 8        | 5                | 1         | 1       | -0.005 | Verde   | 1      | 1.4    | 80      |           |
| 5        | 6                | 1         | 1       | -0.01  | Rojo    | 1      | 1.4    | 65      |           |
| 1        | 7                | 1         | 1       | -0.01  | Rojo    | 0      | 1.4    | 80      |           |
| 13       | 8                | 1         | 1       | -0.01  | Rojo    | 1      | 1.4    | 65      |           |
| 14       | 9                | 1         | 1       | -0.005 | Rojo    | 1      | 1.25   | 80      |           |
| 6        | 10               | 1         | 1       | -0.005 | Rojo    | 1      | 1.25   | 80      |           |
| 4        | 11               | 1         | 1       | -0.005 | Verde   | 0      | 1.4    | 65      |           |
| 16       | 12               | 1         | 1       | -0.005 | Verde   | 1      | 1.4    | 80      |           |
| 10       | 13               | 1         | 1       | -0.005 | Rojo    | 0      | 1.25   | 65      |           |
| 15       | 14               | 1         | 1       | -0.01  | Verde   | 1      | 1.25   | 65      |           |
| 9        | 15               | 1         | 1       | -0.01  | Rojo    | 0      | 1.4    | 80      |           |
| 12       | 16               | 1         | 1       | -0.005 | Verde   | 0      | 1.4    | 65      |           |