



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS - INGENIERÍA INDUSTRIAL

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DMAIC EN UNA EMPRESA
METALMECÁNICA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A:
ING. JOSÉ JESÚS GUILLÉN MARTÍNEZ

DIRECTORA DE TESIS:
M.I. ANN GODELIEVE WELLENS
FACULTAD DE INGENIERÍA - UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. FEBRERO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Soler Anguiano Francisca Irene

Secretario: Dr. Rivera Colmenero José Antonio

Vocal: M. I. Wellens Ann Godelieve

1^{er.} Suplente: Dra. Huerta Barrientos Aida

2^{do.} Suplente: Dra. Segura Pérez Esther

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, CDMX.

TUTOR DE TESIS

M.I. ANN WELLENS

AGRADECIMIENTOS

El termino de esta etapa es el conjunto del esfuerzo de muchos años, no sólo míos si no de muchas personas que siempre estuvieron conmigo en el camino. El concluir esta etapa es una nueva meta cumplida en mi vida y es la razón por la que quiero agradecer y compartir con todos aquellos que han participado conmigo en los momentos que me han llevado hasta aquí.

A mis padres y hermana

En primera instancia quiero agradecer y dedicar este triunfo a mis padres (Celia Martínez y Jesús Guillén) y a mi hermana Valeria, ustedes han estado en cada uno de mis días, viendo y apoyando cada uno de mis planes. Siempre al pendiente de todas mis metas, logros y derrotas. Sin su amor y apoyo no sería lo mismo, gracias a ustedes hoy soy la persona y profesionista que ha ido creciendo día con día, solo puedo agradecerles por TODO lo que me han dado, los amo.

A mi alma mater

Gracias “Universidad Nacional Autónoma de México” por brindarme la oportunidad para prepararme profesionalmente. Por otorgarme todos los conocimientos y facilidades para crecer de forma profesional, personal y deportiva.

Charly, Quique, René, Prof. Calderon y Hector (Fefo)

Por siempre apoyarme, formarme como persona y deportista. Siempre tenían las palabras o acciones para que los días fueran mejores, gracias por enseñarnos que es difícil combinar el deporte y la escuela pero siempre con un esfuerzo extra es posible. Por siempre llevarnos al límite para alcanzar las metas y que con trabajo duro todo es posible.

M.I. Ann Wellens

En esta etapa su apoyo y paciencia hicieron que desarrollara debilidades que tenía, logrando que me convirtiera en un mejor profesional y persona. Gracias a su guía y liderazgo puedo concluir de forma satisfactoria esta nueva meta.

Diego Santiago y Pamela Barbier

Cuando pienso en los dos años del programa de maestría es inevitable pensar en ustedes, agradezco todos los momentos vividos, todas las risas y el apoyo. Definitivamente compartir con ustedes estos dos años de posgrado fue increíble, una amistad que nació desde el día del entrevista y muy rápido se convirtió en una gran hermandad, gracias por siempre estar ahí para lograr este reto.

Armando, Fermin, Popoca e Iván

Durante todos estos años siempre me han demostrado cariño, hoy quiero agradecerles el siempre tener un consejo, una guía o un comentario oportuno para que los días o las situaciones fueran más sencillas. Gracias a todo eso que siempre comparten conmigo he crecido personalmente y son parte fundamental de todo esto.

Isaac, Luis Jiménez, Omar, Luis Lovera y Hector

Definitivamente la vida se hace más fácil cuando se tiene amigos que se convierten en hermanos como ustedes, gracias por siempre estar ahí en los días más felices pero sobre todo en los más difíciles, hemos crecido juntos y estoy seguro que así continuaremos. Gracias por todo hermanos.

Sinodales

Gracias por aportar su valioso conocimiento a este trabajo de investigación. Por su apoyo para poder culminarlo de forma satisfactoria, sin duda cada uno de sus comentarios lo enriqueció de forma significativa.

A todo el equipo de fútbol soccer representativo de la UNAM

Con ustedes compartí gran parte de mi vida universitaria, siempre hubo un ambiente de apoyo y hermandad, aprendimos a luchar por nuestros sueños y que nadie nos quitara lo que era nuestro. Logramos metas que nos propusimos deportivamente pero indudablemente siempre nos apoyamos de la misma forma para lograr lo principal por lo que estamos en esta institución, ser los mejores profesionistas.

“Por mi raza hablará el espíritu”

Índice

Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Justificación	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Hipótesis	3
1.4	Alcances y limitaciones	3
1.5	Resumen	3
CAPITULO 2	Marco teórico	5
2.1	PYMES y el sector metalmecánico	5
2.1.1	Descripción de la empresa	6
2.1.2	Defectos de fundición	10
2.1.3	Defectos de maquinado	11
2.2	Mejora continua	13
2.2.1	Historia de la mejora continua	14
2.2.2	Herramientas de calidad	16
2.2.3	Diagrama de Pareto	17
2.2.4	Diagrama de Ishikawa	19
2.2.5	Pruebas de hipótesis	20
2.2.5.1	Prueba de comparación de proporciones	21
2.2.5.2	Bondad de ajuste	22
2.2.6	Análisis de varianza	23
2.3	Six Sigma	26
2.3.1	Antecedentes	26
2.3.2	Definición	27
2.3.3	DMAIC	28
2.3.3.1	Definir	29
2.3.3.2	Medir	29
2.3.3.3	Analizar	30
2.3.3.4	Implementar	30
2.3.3.5	Controlar	31
2.3.4	Métricas de Six Sigma	32
2.4	Simulación	34
CAPITULO 3	Metodología aplicada	38
3.1	Etapas de la metodología	38
3.1.1	Definir el problema	38
3.1.2	Medir	42
3.1.3	Analizar	44
3.1.4	Implementar	45
3.1.5	Control	45
3.2	Simulación	46
CAPITULO 4	Resultados de la aplicación de la metodología	48
4.1	Etapa 1	48
4.1.1	Definición del problema	48

4.1.2	Medición	49
4.1.3	Análisis	54
4.1.3.1	Análisis del proceso	54
4.1.3.2	Análisis de falla	59
4.1.4	Implementación	62
4.1.5	Control	67
4.1.6	Resultados de la primera etapa	68
4.2	Etapa 2 de la metodología.....	73
4.2.1	Definir.....	73
4.2.2	Medir.....	73
4.2.3	Análisis	75
4.2.4	Implementar	78
4.2.5	Control	80
4.2.6	Resultados.....	80
CAPITULO 5	<i>Evaluación de las mejoras.....</i>	85
5.1	Pruebas de hipótesis.....	86
5.1.1	Primera etapa.....	86
5.1.2	Segunda etapa	89
5.1.3	Análisis de varianza de las medias en diferentes etapas	90
5.1.3.1	Bondad de ajuste para normalidad	90
5.1.3.2	Homocedasticidad	94
5.1.3.3	ANOVA	95
5.2	Nivel sigma.....	96
5.3	Análisis costo/beneficio	98
5.4	Simulación del proceso	102
5.4.1	Fallas de las máquinas de barrenado y machueleado	103
5.4.2	Probabilidad de rechazo	104
5.4.3	Modelo de simulación.....	107
5.4.4	Escenarios de simulación	109
	<i>Conclusiones.....</i>	114
	<i>Recomendaciones.....</i>	115
	<i>Bibliografía</i>	116

Lista de tablas

<i>Tabla 2.1 Clasificación de las Pymes</i>	5
<i>Tabla 2.2 Resumen de cálculos de ANOVA</i>	25
<i>Tabla 3.1 Base de datos producción</i>	43
<i>Tabla 3.2 Base de datos de piezas rechazadas</i>	43
<i>Tabla 4.1 Medición de defectos</i>	50
<i>Tabla 4.2 Defectos de producción para realizar el diagrama de Pareto</i>	51
<i>Tabla 4.3 Tabla comparativa de las operaciones del proceso del Base Bracket Q5</i>	72
<i>Tabla 5.1 Pruebas de hipótesis para los defectos del Base Bracket Q5</i>	88
<i>Tabla 5.2 Pruebas de hipótesis para defectos de Base Bracket Q5</i>	90
<i>Tabla 5.3 Resumen de datos para el cálculo de prueba de bondad de ajuste Shapiro-Wilks</i>	91
<i>Tabla 5.4 Cálculo del estadístico de Shapiro-Wilks</i>	92
<i>Tabla 5.5 Resumen de datos y cálculos de Shapiro-Wilk para la primera etapa</i>	93
<i>Tabla 5.6 Resumen de datos y cálculos de Shapiro-Wilk para la segunda etapa</i>	94
<i>Tabla 5.7 Resumen de datos y resultados de la prueba de Bartlett</i>	95
<i>Tabla 5.8 Tabla de resumen de datos para el análisis ANOVA (Calculado con Excel)</i>	96
<i>Tabla 5.9 Tabla de resumen de ANOVA (Calculado con Excel)</i>	96
<i>Tabla 5.10 Resumen de cálculos para el nivel Six Sigma</i>	98
<i>Tabla 5.11 Comparación de costos del antes y después de la mejora</i>	100
<i>Tabla 5.12 Tiempos de operación ocupados en la simulación</i>	103
<i>Tabla 5.13 Resumen de datos de las máquinas</i>	104
<i>Tabla 5.14 Resumen de datos para la función de densidad</i>	105
<i>Tabla 5.15 Costo-beneficio de escenario 1 vs escenario 4</i>	111
<i>Tabla 5.16 Costo beneficio real vs ideal</i>	112

Lista de Figuras

Figura 2.1 Organigrama de la empresa. Fuente: Elaboración propia (2017).	8
Figura 2.2 Base Bracket Q5 y sus partes críticas. Fuente: Elaboración propia (2017).	9
Figura 2.3 Ejemplo de una pieza chueca.	13
Figura 2.4 Diagrama de Pareto. Fuente: Elaboración propia (2017).	18
Figura 2.5 Diagrama de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia (2017).	20
Figura 2.6 Ciclo de la metodología DMAIC. Fuente: Elaboración propia (2017).	29
Figura 3.1 Diagrama de flujo del Base Bracket. Fuente: Elaboración propia (2017).	40
Figura 3.2 Gráfico de producción y rechazo. Fuente: Elaboración propia (2018).	44
Figura 4.1 Diagrama de Pareto. Fuente: Elaboración propia (2017).	52
Figura 4.2 Piezas producidas en maquinado. Fuente: Elaboración propia (2017).	53
Figura 4.3 Piezas entregadas a almacén. Fuente: Elaboración propia (2017).	53
Figura 4.4 Layout de la planta de producción. Fuente: Elaboración propia (2017).	54
Figura 4.5 Diagrama de espaguetti que muestra el flujo del Base Bracket Q5.	56
Figura 4.6 Pieza con poros. Fuente: Elaboración propia (2017).	58
Figura 4.7 Espacio para colocar la máquina ranuradora. Fuente: Elaboración propia (2017).	58
Figura 4.8 Diagrama de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia (2017).	59
Figura 4.9 Área de maquinado. Fuente: Elaboración propia (2017).	60
Figura 4.10 Cajas para transportar el material.	61
Figura 4.11 Acomodo de piezas vista lateral. Fuente: Elaboración propia (2017).	61
Figura 4.12 Acomodo de piezas vista superior. Fuente: Elaboración propia (2017).	62
Figura 4.13 Diagrama de flujo propuesto Fuente: Elaboración propia (2017).	63
Figura 4.14 Máquina ranuradora en su nueva ubicación. Fuente: Elaboración propia (2017).	64
Figura 4.15 Flujo propuesto del Base Bracket Q5. Fuente: Elaboración propia (2017).	65
Figura 4.16 Mejora en el acomodo de las piezas en las cajas. Fuente: Elaboración propia (2017).	66
Figura 4.17 Nuevo diseño de la mesa de maquinado.	67
Figura 4.18 Tarjeta viajera de trazabilidad del producto. Fuente: Elaboración propia (2017).	68
Figura 4.19 Tarjeta viajera dentro de la caja de Base Bracket Q5. Fuente: Elaboración propia (2017).	68
Figura 4.20 Gráfico del comportamiento de piezas con golpe. Fuente: Elaboración propia (2018).	69
Figura 4.21 Gráfico del comportamiento de piezas con clip chueco. Fuente: Elaboración propia (2018).	70
Figura 4.22 Comportamiento de piezas sin ranura. Fuente: Elaboración propia (2018).	71
Figura 4.23 Comportamiento de piezas sin barreno. Fuente: Elaboración propia (2018).	71
Figura 4.24 Comportamiento de las piezas con poro. Fuente: Elaboración propia (2018).	72
Figura 4.25 Piezas sin machuelo detectadas por el departamento de calidad. Fuente: Elaboración propia (2018).	74
Figura 4.26 Piezas sin barrenos detectadas en departamento de calidad. Fuente: Elaboración propia (2018).	75
Figura 4.27 Piezas sin ranura detectadas en departamento de calidad. Fuente: Elaboración propia (2018).	75
Figura 4.28 Layout de la planta, en verde se muestra el área en el que es almacenado el producto previo al proceso de machuelo. Fuente: Elaboración propia (2018).	77
Figura 4.29 Flujo continuo en la línea de producción Base Bracket Q5. Fuente: Elaboración propia (2018).	79
Figura 4.30 Comportamiento de la producción en línea durante el proceso de mejora. Fuente: Elaboración propia (2018).	81
Figura 4.31 Piezas con golpe en el área de maquinado. Fuente: Elaboración propia (2018).	82
Figura 4.32 Comportamiento de piezas con falta de barreno. Fuente: Elaboración propia (2018).	83
Figura 4.33 Comportamiento de piezas con falta de ranura. Fuente: Elaboración propia (2018).	83
Figura 4.34 Comportamiento de piezas con falta de machuelo. Fuente: Elaboración propia (2018).	84

<i>Figura 5.1 Pirámide de Pareto comparando porcentaje de defectos antes y después de las mejoras. Fuente: Elaboración propia (2019).</i>	85
<i>Figura 5.2 Comportamiento del porcentaje de piezas rechazadas mensualmente. Fuente: Elaboración propia (2018).</i>	86
<i>Figura 5.3 Resultados de la producción de maquinado con las mejoras implementadas. Fuente: Elaboración propia (2019).</i>	89
<i>Figura 5.4 Histograma y polígono de frecuencias de defectos por día. Fuente: Elaboración propia (2019).</i>	105
<i>Figura 5.5 Modelo de simulación. Fuente: Elaboración propia (2019).</i>	107
<i>Figura 5.6 Comparación de sistema real y escenarios de simulación. Fuente: Elaboración propia (2019).</i>	109

Capítulo 1 Introducción

En la actualidad, el tema de la calidad es un factor importante en todas las industrias, para lograr posicionarse en los primeros lugares de su mercado y ser líderes en su ramo. Por esta razón, es conveniente adoptar una estrategia de mejora continua y utilizar diversas herramientas de mejora, para lograr alcanzar el mayor aprovechamiento de los recursos y ofrecer un mejor producto o servicio al cliente.

El presente trabajo pone en práctica una metodología para disminuir el porcentaje de defectos en la empresa PRODDI, que es una empresa mexicana metalmecánica perteneciente al sector productivo, utilizando como base las etapas de la mejora continua (planear, hacer, verificar y actuar). Se utilizó una metodología específica de mejora continua, en forma conjunta con herramientas de calidad que ayudan a identificar los principales problemas y sus causas y de esta forma buscar soluciones viables al problema mencionado.

Se eligió la **metodología DMAIC**, que es el acrónimo de los pasos de la metodología: Definir, Medir, Analizar, Implementar y Controlar. La empresa metalmecánica en donde se aplicó la metodología fabrica piezas para uso doméstico y para el **sector automotriz**, la línea de producción que se eligió para poner en práctica esta metodología produce específicamente una pieza automotriz. Se buscó cuáles eran las principales fuentes de variabilidad del proceso, para detectar las causas de que las piezas fueran rechazadas, de las demoras con el departamento de logística para las entregas y de las quejas de los clientes por piezas defectuosas que no eran detectadas de manera oportuna en la planta.

Se ocuparon técnicas estadísticas como histogramas y pruebas de hipótesis de proporciones, entre otras, para realizar de manera cuantitativa la comparación del impacto que tuvieron las mejoras aplicadas al proceso. Se calcularon el nivel sigma y los Defectos Por Millón de Oportunidades (DPMO) en el proceso, antes y después de las mejoras, para corroborar si las mejoras que fueron propuestas y aplicadas lograron disminuir la variabilidad del proceso. De esta forma se determinó en qué situación inicial estaba la empresa y cuánto se había logrado avanzar con respecto a su estado inicial, buscando disminuir la probabilidad de tener piezas fuera de especificaciones. En una Tabla de costo-beneficio se resume de forma monetaria el impacto que tuvieron las mejoras aplicadas, y se puede observar el ahorro que logró la empresa aplicando una mejora continua en una de sus líneas de producción.

Por último, se realizó una simulación del proceso final en el que se utilizaron todas las mejoras, para poder analizar otros escenarios posibles y estudiar la posibilidad de proponer otras metodologías de mejora continua, buscando optimizar todavía más los costos de la empresa.

1.1 Justificación

La presente investigación tiene como principal objetivo reducir los costos, optimizar procesos y estandarizarlos. Para lograr esto se usaron diferentes herramientas para identificar las principales áreas de oportunidad que se presentan, así como, la variabilidad existente en el proceso para de esta manera analizar y buscar posibles soluciones. Con dicha metodología se pretende mitigar el porcentaje de producción defectuosa del proceso; de igual manera se hace una reestructuración del proceso, para tener un mejor manejo y flujo del producto para un mayor control. El resultado obtenido es el mejoramiento en la calidad del producto, reducción de costos por desperdicios, mayor eficiencia en el proceso, mayor productividad de los trabajadores, un mayor control en el flujo del material, contribuyendo todo lo anterior a un mejor control del proceso, que posicionará a la empresa en el mercado por encima de sus competidores directos.

1.2 Objetivos

Implementar una metodología de mejora continua, así como, otras herramientas auxiliares, para identificar y disminuir la variabilidad que existe en un proceso de manufactura metalmecánico, incrementando su eficiencia y teniendo un manejo de material mejor controlado, con la finalidad de disminuir los costos, obtener un mayor aprovechamiento de recursos y brindarle un producto de alta calidad al cliente.

Objetivos específicos

- Identificar las principales áreas de oportunidad en el área de maquinado del proceso analizado, para disminuir el porcentaje de defectos.
- Disminuir o eliminar la variabilidad del proceso, para reducir los reprocesos.
- Disminuir los paros no planeados en las máquinas para cumplir los objetivos y no generar *stock* innecesario en la línea.
- Optimizar el aprovechamiento de los recursos, reestructurando el orden del proceso.

1.3 Hipótesis

Con la implementación de la metodología DMAIC en la empresa "PRODDI", se logrará disminuir la variabilidad de sus procesos y aumentará el aprovechamiento de sus recursos, obteniendo un mejor manejo de material, un proceso estable e identificando de manera oportuna defectos con el fin de evitar procesos innecesarios que aumentan los costos en sus líneas de producción.

1.4 Alcances y limitaciones

El presente trabajo abarca el proceso productivo de una pieza metalmecánica del sector automotriz en el área de maquinado de la empresa PRODDI, ocupando una metodología de mejora de procesos buscando reducir su variabilidad mediante herramientas de calidad y estadísticas. A partir de la aplicación de esta metodología se comenzarán a realizar mejoras a las líneas de producción restantes, creando consciencia de la implementación de proyectos de mejora. Aunque se aplicó a un solo producto, la metodología es aplicable a cualquier proceso productivo o administrativo en el que se quiera mejorar.

Las limitaciones más importantes de este trabajo fueron la falta de datos históricos por parte de la empresa para evaluar de manera más precisa el comportamiento del proceso y su evolución a lo largo del tiempo, la falta de un área especializada dedicada a proyectos de mejora y la documentación de proyectos pasados en dónde se haya aplicado alguna metodología de mejora.

1.5 Resumen

El presente trabajo generó una filosofía de mejora entre los empleados de la empresa PRODDI, lo que hizo que se obtuvieran resultados con mejora dentro del proceso productivo. Para aplicar la metodología DMAIC es importante **definir** cuáles son los problemas principales. El objetivo de tener un diagnóstico de los problemas que se generan en la empresa es detectar las áreas de oportunidad.

En la etapa de **medir** se observaron los datos que se obtuvieron con el diagnóstico. De esta forma se ponderaron las actividades que generan el mayor porcentaje de rechazo de piezas, y se buscaron diferentes soluciones para su mejora.

La siguiente fase fue el **analizar** las actividades antes detectadas para buscar la causa raíz del porqué se está generando la irregularidad en las piezas fabricadas y estudiar algunas posibles soluciones.

La fase de **mejora** consiste en buscar una solución para los aspectos ya detectados en las fases anteriores. En el presente trabajo se implementó la estandarización de proceso, así como un nuevo orden en el mismo, ya que se detectó que algunos de los fallos son originados por la falta de estandarización, así como por un orden poco adecuado en el proceso, generando mayores costos. Después de esta etapa se logró un mejor orden en las operaciones y una disminución en la cantidad de defectos, así como su detección oportuna, reduciendo costos.

Por último, está la etapa de **control**; ésta es el resultado del conjunto de las anteriores ya que se pretende que estos cambios se conserven y se renueven constantemente, buscando siempre la ausencia de defectos. En esta fase se pretende concientizar a los trabajadores a cargo para que los cambios efectuados perduren.

Dentro de la implementación de esta metodología, se recurrió a la ayuda del gerente de la empresa para que se diera autorización de las propuestas de mejora, mismo caso con la entrega de los resultados obtenidos durante dichos cambios.

CAPITULO 2 Marco teórico

2.1 PYMES y el sector metalmeccánico

Un grupo importante dentro de la clasificación de las empresas son las PYMES, que son pequeñas y medianas empresas que cuentan como máximo con 250 empleados, y tienen una facturación moderada. Si bien es cierto que las empresas grandes representan gran importancia en la economía, las PYMES son el motor de la economía del país y son las principales fuentes de trabajo.

Las PYMES están más cercanas al cliente, se concentran más en él y pueden conocer mejor sus necesidades, y por tanto satisfacerlas de inmediato. Las grandes empresas suelen trabajar en cadena o con productos que tienden a la estandarización y producen a menores costos. Las PYMES en México representan el 72% del empleo y aportan el 52% del Producto Interno Bruto (PIB) (CONDUSEF, 2015).

En la **Tabla 2.1** se observa la clasificación de estas pequeñas y medianas empresas.

*Tabla 2.1 Clasificación de las Pymes
 Fuente: Moreno, 2009.*

Estratificación				
Tamaño	Sector	Rango de número de trabajadores	Rango de monto de ventas anuales (mdp)	Tope máximo combinado*
Micro	Todas	Hasta 10	Hasta \$4	4.6
Pequeña	Comercio	Desde 11 hasta 30	Desde \$4.01 hasta \$100	93
	Industria y Servicios	Desde 11 hasta 50	Desde \$4.01 hasta \$100	95
Mediana	Comercio	Desde 31 hasta 100	Desde \$100.01 hasta \$250	235
	Servicios	Desde 51 hasta 100		
	Industria	Desde 51 hasta 250	Desde \$100.01 hasta \$250	250

Los criterios para determinar si una empresa es PYME depende del ramo (ya sea comercio, industria o servicios), el número de trabajadores y sus ventas anuales.

En cuanto al sector metalmeccánico, México es el séptimo importador de maquinaria en el mundo; los principales importadores son USA, Alemania y Japón. La industria metalmeccánica nacional está integrada por 23 mil 120 empresas. La industria automotriz es uno de los motores de la rama metalmeccánica y tiene una demanda estimada de 7 millones de dólares anuales, de acuerdo con la Unidad de Promoción de Exportaciones de ProMéxico (Juárez, 2016). En 2014, la industria automotriz

terminal tuvo un crecimiento en tres ámbitos de gran relevancia: mercado interno, exportaciones y producción. Durante este año, el sector automotriz terminal y de autopartes representaron aproximadamente el 3% del PIB nacional y 17% del PIB manufacturero mexicano (ProMéxico Automotriz, 2016).

México pasó de ser un país exportador de manufacturas simples, a convertirse en generador de innovación. En el país existen más de 30 centros de diseño automotriz (ProMéxico Automotriz, 2016). Entre los productos del sector manufacturero con mayores exportaciones se ubicaron: automotrices (35%), maquinaria, equipo y productos metálicos (INEGI). De manera particular, la producción de vehículos ligeros superó sus mejores niveles históricos en el año 2017, al fabricarse 3,773,569 vehículos ligeros, 8.9% por encima de las unidades manufacturadas en 2016.

2.1.1 Descripción de la empresa

La empresa seleccionada para aplicar la metodología propuesta es una empresa mediana productiva que consta de una plantilla de 205 colaboradores, dedicada al giro metalmecánico: Productos y Derivados Domésticos e Industriales (PRODDI).

PRODDI es una empresa mexicana dedicada a la inyección de alta presión de aluminio y zamak. La atención de su personal de ventas, la calidad de sus productos y el compromiso del personal de logística para entregar en tiempo y forma le ha abierto las puertas a la empresa para contar con clientes nacionales e internacionales en sus productos domésticos y automotrices.

La empresa tiene cinco máquinas de inyección de aluminio, seis máquinas de inyección de zamak, trece prensas hidráulicas, dos máquinas de control numérico computarizado, dos tornos, dos fresadoras, una rectificadora, seis taladros mecánicos, una máquina barrenadora neumática, una machueleadora y cinco líneas de producción en el área de maquinado, de las cuales cuatro son para uso exclusivo de productos automotrices y una para productos domésticos.

Misión

“Nuestra misión es mejorar continuamente nuestros productos, a fin de satisfacer las necesidades de nuestros clientes, lo que nos permite prosperar como negocio y proporcionar las utilidades razonables a nuestra empresa.”

Visión

“Hacer de PRODDI una compañía con un excelente ambiente de trabajo mediante el respeto y trabajo en equipo. Ser el proveedor global preferente de nuestros clientes.”

Política de calidad

“Productos y Derivados Domésticos e Industriales S.A. de C.V. está comprometido a entregar productos de alta calidad, a tiempo y a precios competitivos a través de un control de proceso y la mejora continua. “

Ubicación

La empresa se encuentra ubicada en la ciudad de México, en Av. Toluca # 438 col. Olivar de los Padres, Alcaldía de Álvaro Obregón.

En la **Figura 2.1** se muestra el organigrama de la empresa, se puede observar la estructura jerárquica de manera vertical; cuáles son las áreas que conforman la organización, la relación entre cada una de ellas y a primera vista cuales son los cargos con mayor responsabilidad.

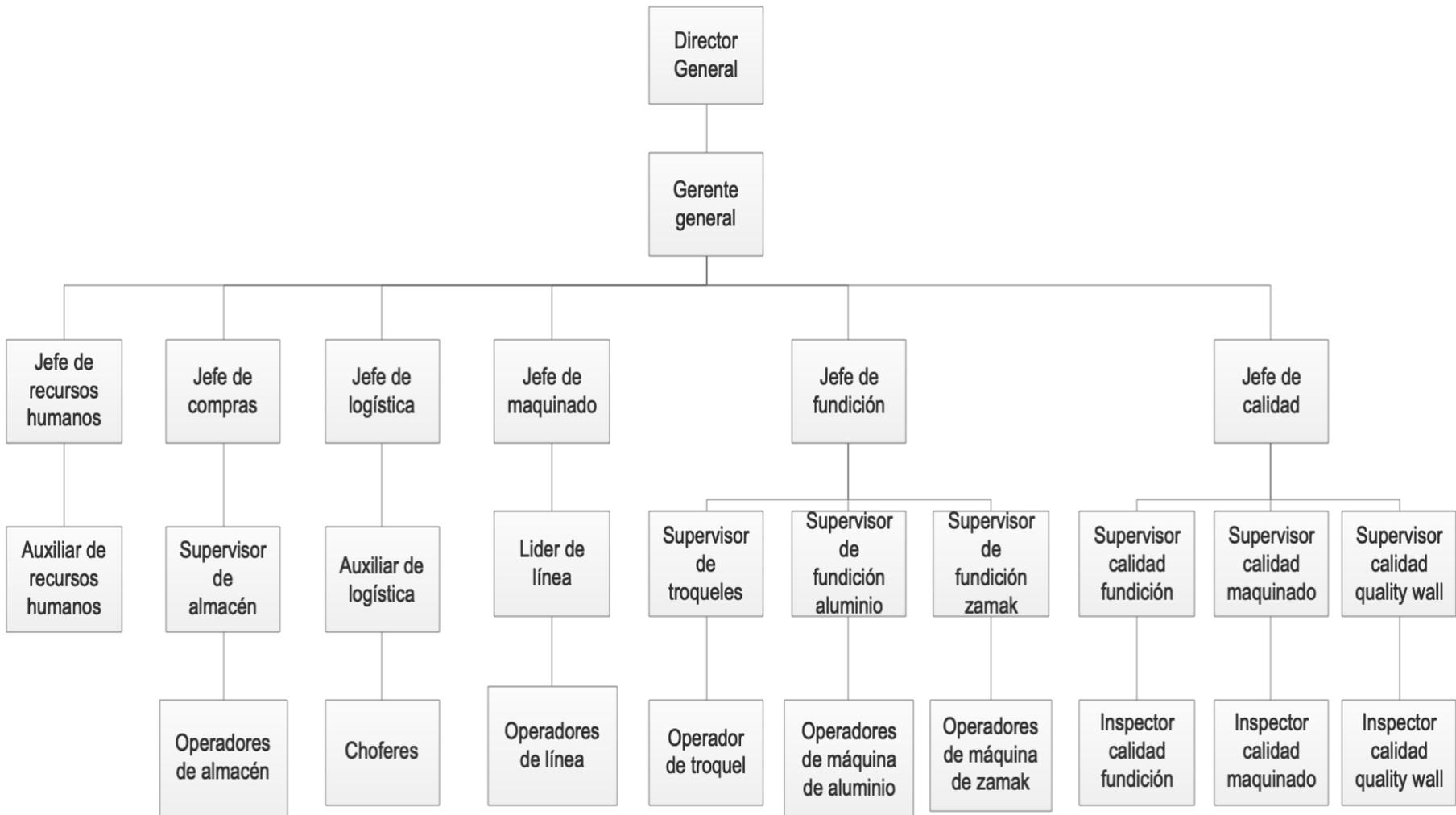


Figura 2.1 Organigrama de la empresa. Fuente: Elaboración propia (2017).

En la **Figura 2.1** se puede observar que la empresa cuenta con un director general, un gerente general encargado de planear y dirigir la organización, cinco jefaturas responsables de supervisores y operadores; en el caso de recursos humanos, el jefe únicamente está a cargo del auxiliar de recursos humanos. En total, la empresa tiene 205 trabajadores.

Se eligió la línea de la pieza *Base Bracket Q5* para este proyecto, ya que esta pieza es una de las que impacta mayormente en las utilidades de la empresa. En esta línea de producción se detectaron varios problemas que estaban impactando directamente al departamento de logística y calidad. La pieza *Base Bracket Q5* forma parte de un espejo automotriz, y está hecha de aluminio; se hace por inyección a alta presión. Se extrae del molde, se enfría y se pasa al departamento de troquelado, en dónde se coloca en prensas para cortar la rebaba. El departamento responsable de continuar con el proceso es el de maquinado; los procesos de este departamento corresponden a lijar, ranurar la pieza, barrenar, machuelear y destapar los orificios, así como retirar los filos cortantes y exceso de rebaba. Por último, el departamento de calidad inspecciona y da el visto bueno a las piezas.

En la **Figura 2.2** se muestra la pieza *Base Bracket Q5* y se indica el nombre de sus partes críticas como lo son el tourillón, la ranura, el clip, el machuelo y los barrenos. Más adelante en este trabajo se describirán problemas que hay en cada uno de ellos.

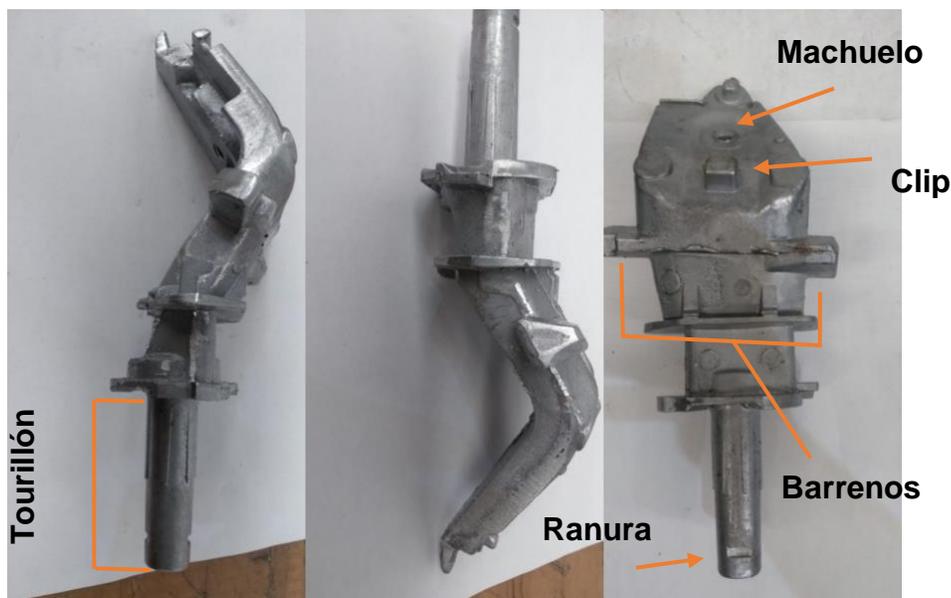


Figura 2.2 Base Bracket Q5 y sus partes críticas. Fuente: Elaboración propia (2017).

2.1.2 Defectos de fundición

El *International Atlas of Casting Defects* ayuda a clasificar e identificar las causas de los defectos de fundición (Schey, 2002); asimismo, la *American Foundrymen's Society* tiene un programa continuo para desarrollar un sistema experto. Los defectos, que suelen aparecer con no poca frecuencia en las piezas fundidas, tienen en general su origen en que alguna parte del proceso no ha sido debidamente controlada. La fusión, el colado y la solidificación comprenden muchas operaciones complicadas, siendo el control perfecto, imposible. No es sorprendente que en el proceso de fundición se encuentren mayor variedad y número de defectos, que en cualquier otro proceso de fabricación. El estudio de los defectos, antes de ser una tendencia negativa del aprendizaje, es algo muy importante para todos los que intervienen, incluso el cliente. Estos defectos deben ser analizados y comprendidos, llevando el análisis hasta sus causas para corregirlas.

Toda empresa se preocupa por reducir lo que representa una pérdida de tiempo, de material y de dinero. Por eso, todas las piezas son recogidas y examinadas por los jefes responsables, o también por operarios, interesados en:

- Diagnosticar los defectos.
- Evaluar las causas que los han provocado.
- Evaluarlos en peso y en porcentaje respecto a la producción total, y registrarlos en el estado estadístico de la producción.

Los defectos manifiestos de la pieza pueden afectar:

- A su forma, como deformaciones, aplastamientos, hundimientos, empujes, rebabas y movimientos de las cajas.
- A la superficie, como un aspecto basto, hinchazones, abombamientos, penetraciones, exfoliaciones, inclusiones de arena.
- Al conjunto de la pieza; como soldaduras e intermitencias, piezas no llenas y discontinuidades, roturas de partes del molde, escapes de metal, falta de metal, hendiduras, grietas y roturas.

Los defectos ocultos se manifiestan por:

- Soluciones internas de continuidad, como porosidades, pequeños agujeros, burbujas, sopladuras, rechupes, contracciones, meniscos, tensiones y grietas.

- Composición y estructura inadecuada, como temple difuso, temple localizado, temple inverso, estructura abierta o gruesa y segregaciones de grafito.
- Inclusiones de materias heterogéneas, como gotas frías, escoria y arena.

Las porosidades, los pequeños agujeros, las burbujas y las sopladuras tienen todas un aspecto similar. Se trata, en efecto, de burbujas esféricas o aplanadas de superficie lisa, provocadas por gases disueltos en el metal que escapan en el acto de la solidificación, o de gases o vapores que se forman en el molde, y que, a causa de la escasa permeabilidad del molde, tratan de encontrar un paso a través del metal líquido, donde quedan aprisionadas en el acto de la solidificación. Los defectos que sólo pueden descubrirse penetrando bajo la superficie de la pieza son los más dañinos, porque, en general, no pueden ser reconocidos desde el exterior por los medios normales, y no salen a la luz hasta que se procede al mecanizado, al someter la pieza a la prueba de presión, o bien, aún peor, cuando, ya aplicada a su trabajo, cede a las fuerzas externas y se rompe.

2.1.3 Defectos de maquinado

En el área de maquinado se trabaja con *máquinas-herramientas*, que se utilizan para quitar el material sobrante a las piezas. En la empresa se tiene diferentes máquinas-herramientas como: los tornos, fresadoras, barrenadoras, machueledora, limas neumáticas, etc. y dependiendo de las necesidades, el material y la precisión del trabajo, se elige en cada paso del proceso cual es la más conveniente utilizar.

Los defectos que suelen aparecer con frecuencia en el departamento de maquinado tienen su origen principalmente en el manejo del material y en los procesos de mecanizado. Estos defectos deben ser analizados y comprendidos, llevando el análisis hasta sus causas para corregirlas (Doyle, 1988). La precisión de la máquina-herramienta se caracteriza por la capacidad de la máquina de producir piezas de la forma y dimensiones requeridas, esto es conseguir las tolerancias requeridas y la calidad superficial deseada. Por lo tanto, las exigencias de precisión de las máquinas-herramienta son resultado de la tolerancia requerida de los componentes fabricados.

La inducción a un error en una máquina-herramienta se debe a diferentes factores como: problemas térmicos, a las fuerzas que se generan durante el trabajo de la máquina, los errores geométricos que pudiera tener la máquina, al sistema de sujeción de la pieza, cinemáticos, deformación de la pieza debido al proceso de mecanizado y/o a la fuerza de amarre, vibraciones, fallas en el sistema de control, mal apoyo de la pieza sobre el utillaje de amarre, etc.

Los errores en la pieza mecanizada se agrupan como sigue:

- *Errores dimensionales* que provocan la desviación de las dimensiones producidas en el proceso de fabricación con respecto a las exigidas en la pieza, determinadas por medio de las tolerancias especificadas.
- *Errores geométricos* son aquellos que afectan a la geometría, contornos y relaciones geométricas de la pieza. En este apartado entran factores como paralelismo, perpendicularidad, planitud, rectitud, etc.
- *Errores de acabado superficial*, relacionados con la calidad de la superficie obtenida, como es el valor de la rugosidad, la orientación de la misma o errores en las geometrías en los procesos de tutorización.
- *Errores de la integridad superficial*, que afectan al futuro funcionamiento y vida de la pieza como son los quemados, las grietas, la tensión residual, etc.

Para este trabajo se describirán los defectos con los nombres que PRODDI le ha asignado a cada uno de ellos, para conocer cuál es el desperfecto de la pieza y porqué se rechaza.

Golpe: es un defecto presentado en la parte superior del tourillón de la pieza este genera una zona aboyada, este se detecta de forma visual ya que deforma la circunferencia de la pieza.

Posición: se presenta en el proceso de barrenado y este defecto corresponde a un error en la posición en donde se deben realizar los barrenos: la posición de donde fue mecanizado el barreno no es la correcta de acuerdo con las medidas del diseño de la pieza.

Chueca: es el nombre que se le da al defecto cuando el clip de la parte trasera de la pieza esta chueco, esto afecta al momento de ensamblarse ya que este clip actúa como seguro; el defecto se muestra en la **Figura 2.3**.



Figura 2.3 Ejemplo de una pieza chueca.
Fuente: Elaboración propia (2017).

Distancia: este concepto corresponde al defecto por una medida incorrecta que tiene la pieza desde su base hasta la ranura; esta medida está dada por el dibujo y el error en distancia es generado por la variabilidad que existe en la máquina ranuradora.

Ajustes: este concepto incluye el uso de piezas producidas para apoyar en la calibración de la maquinaria. Se ocupan en el momento que una máquina está fuera de las tolerancias del proceso para poder establecer las medidas correctas de trabajo en las máquinas. Estas piezas en sí no corresponden a un defecto de producción; sin embargo, al no contar con las medidas solicitadas por el cliente, son consideradas piezas fuera de especificación por lo que se cuentan dentro de las piezas rechazadas. La mayor parte de este defecto se genera en la máquina ranuradora, ya que es la máquina con mayor variación o desajuste.

Pasa no go: este defecto ocurre cuando el barreno tiene un diámetro mayor al establecido en las especificaciones. Se presenta al mecanizar la pieza en la máquina barrenadora cuando el pin *no go*, que es el que tiene una medida superior a la establecida en la tolerancia del dibujo, pasa indebidamente a través de los barrenos.

2.2 Mejora continua

La mejora continua es una metodología que pretende mejorar los procesos, productos y servicios de una empresa. Crea una filosofía de detección de errores o áreas de mejora, para buscar siempre la perfección. La mejora continua debe ser un modo de vida dentro de la organización, y es precisamente esto lo que hace de la mejora continua una herramienta tan valiosa y, a la vez, difícil de implementar

(Marín-García et al., 2008). La mejora continua constituye un método muy eficaz para lograr la calidad total, a través de la búsqueda de la excelencia. Ha evolucionado a lo largo del tiempo a partir del concepto de calidad y se basa principalmente en la herramienta del ciclo de Deming o ciclo PHVA (planear, hacer, verificar y actuar), ha sido utilizado ampliamente por los sistemas de gestión de calidad, con el propósito de generar una mayor competitividad para la empresa.

En México, los procesos de mejora continua han tenido un gran impacto. Durante los últimos 20 años, empresas como Ford, General Electric, Nissan, Toyota, entre otros, han expandido sus fábricas a territorio mexicano, y han implementado programas de mejora, de tal forma que los trabajadores, desde los gerentes generales de las plantas hasta el obrero común, deben conocer el proceso, y familiarizarse con él.

Un producto defectuoso significa la pérdida de los recursos empleados para producir un artículo o servicio defectuoso, ya que se invirtieron materiales, tiempo-máquina, y, lo más importante, el tiempo de un trabajador que produce una pieza que a fin de cuentas no sirvió para agregarle valor al producto. En este rubro también entran los retrabajos ya que, si bien el defecto se corrige, el retrabajo implica realizar una o más tareas dos o más veces, incurriendo así en gastos y recursos de la empresa que afectan a las utilidades.

2.2.1 Historia de la mejora continua

Los primeros indicios de que la calidad es importante se muestran en el año 2150 a. C; en donde la calidad de la construcción de una casa estaba regida por el código de Hammurabi, que establecía “si un constructor construye una casa y no lo hace con buena resistencia y la casa se derrumba y mata a los ocupantes, el constructor debe ser ejecutado” (Peinado Lara, 2008). Otro ejemplo son los fenicios, que le cortaban la mano a quien hiciera un producto defectuoso, aceptaban o rechazaban los productos y ponían en vigor las especificaciones. Alrededor del año 1450 a. C., los inspectores egipcios comprobaban las medidas de los bloques de piedra con un pedazo de cordel. Los mayas también usaron este método. La mayoría de las civilizaciones antiguas daban gran importancia a la equidad en los negocios y cómo resolver las quejas, aún cuando esto implicara condenar al responsable a la muerte, la tortura o la mutilación.

En el siglo XIII empezaron a funcionar los gremios, por lo que los artesanos se convirtieron tanto en instructores de aprendices como en inspectores, ya que conocían a fondo su trabajo, sus productos y sus clientes, y se empeñaban en que hubiera calidad en lo que hacían; a este proceso se le denominó control de calidad

del operario. En el año 1854, en los inicios de revolución industrial, la calidad no era tan importante, ya que había muy poca competencia.

En 1924, Walter A. Shewhart desarrollo una gráfica estadística, se considera que esta gráfica introdujo el control estadístico de la calidad (Índice, 2014). Shewhart se interesó en muchos aspectos del control de la calidad. Aunque su interés primordial eran los métodos estadísticos, también estaba muy consciente los principios de la ciencia de la administración y del comportamiento, siendo de la primera persona en hablar de los aspectos filosóficos de la calidad. En 1941 Joseph Juran, implementó el primer proceso para el control de calidad, en tres series de pasos: *planificación*, *mejora* y *control*, para iniciar lo que llamó la mejora continua.

Ishikawa, en el año de 1943, mostró a un grupo de ingenieros un método que el llamó *diagrama causa-efecto*, como herramienta para identificar y controlar la calidad en la producción y sus variaciones.

También durante la Segunda Guerra Mundial, el departamento de guerra de los Estados Unidos implementó los diagramas de control para analizar si las municiones del ejercito cumplían con los requisitos de producción (Griful y Canela, 2002). Durante la posguerra de la Segunda Guerra Mundial, Japón introdujo una filosofía de "hacer las cosas bien a la primera", ya que por la condición que estaban después de la guerra, realizar el trabajo dos veces era más costoso que invertir en un análisis de la producción. En 1954, Juran visitó Japón y ayudó a introducir un proceso que beneficiaba a las empresas japonesas, a raíz de que su libro *Manual de Control de Calidad* que no recibió la aceptación en Estados Unidos (Carro y González, 2000).

En 1961 el ingeniero japonés Shigeo Shingo introdujo el poka-yoke, un sistema de inspección, porque el control de calidad era más costoso que el proceso de hacer todo con calidad. Su significado japonés es poka: errores inadvertidos y yoke: a prueba de, es decir, el término significa a prueba de errores y su finalidad es la prevención de defectos (Socconini, 2008).

Existen tres tipos de *poka-yoke*, de acuerdo con las necesidades del proceso (Villaseñora,2007):

- **Por sus características:** Este es de acuerdo con su peso, dimensión o forma del producto.
- **Por su procedimiento:** Se basa en la secuencia de las operaciones, es decir que no puede realizarse una operación si se ha omitido algún paso.
- **Por valores fijos:** En esta variante se usan contadores para detectar operaciones o pares faltantes. En el método de sobrantes se tiene el número justo de piezas para asegurarse que no hay sobrantes. En la detección de la

condición crítica, como temperatura, presión, etc., el proceso se para si no se tiene el valor adecuado.

En 1970 se originó la filosofía *Just-in-time (JIT)*, que es un sistema de producción ágil, que le da valor al producto que se manufactura, eliminando cualquier otra actividad que sea obsoleta o no tenga beneficio al producto. En 1986, se creó el *Kaizen* (mejora continua) por Masaiki Imai, que significa, que la calidad no consistía en invertir más en el producto, sino con los recursos existentes mejorar el producto.

En 1987 nace la familia ISO, que consiste en una serie de reglas para estandarizar los procesos, con sistemas de control, que garantizan que el producto ha sido realizado con los procesos adecuados (Camisón et al., 2006). Las normas y reglamentos han regulado los términos de calidad y mejora continua de una empresa, especificando la revisión, mejoramiento, vigilancia, aseguramiento y actividad de verificación. La serie ISO 9000 se implementó en la búsqueda de normalizar, ya que en los años 80 muchas de las empresas no estuvieron en condiciones de competir, y al firmarse el Tratado de Libre Comercio en 1994, se estableció la apertura del mercado, y una serie de propuestas para implementar estos tipos de sistemas o mejoras en el ámbito de la calidad.

Los cambios continuos y rápidos en la industria han generado que las empresas mexicanas implementen sistemas de mejora continua. La aplicación de la mejora continua tiene como resultado que las PYMES puedan ofrecer productos de calidad, así como procesos mejorados de desarrollo de productos y servicios. Estos procesos de mejora continua en las PYMES son importantes, ya que éstas juegan un papel muy importante en el crecimiento del PIB y son las principales promotoras de empleo.

2.2.2 Herramientas de calidad

El ingeniero debe utilizar las herramientas apropiadas para realizar un mejor trabajo en el menor tiempo posible. Existen diferentes herramientas para la solución de problemas y cada una de ellas tiene aplicaciones específicas (Niebel,2009).

Si las herramientas para determinar la calidad de un producto se usan de manera adecuada permiten localizar las áreas en las que se puede aplicar una mejora de gran impacto y además facilitan la identificación de las causas raíz de los problemas. El primero en mencionar las siete herramientas básicas de calidad fue el ingeniero Kaoru Ishikawa y estas ayudan a controlar el proceso y a orientar en la búsqueda de causas para las mejoras (Gutiérrez, 2010).

Las siete herramientas básicas de calidad son las siguientes:

1. Diagrama de Pareto.
2. Diagrama de Ishikawa.
3. Diagrama de flujo.
4. Hojas de verificación.
5. Histogramas.
6. Diagramas de control.
7. Diagramas de dispersión.

Las herramientas ayudan a recopilar y analizar datos para tomar decisiones con base en ellos y buscar la mejor solución de los problemas. Esto no significa que en todos los problemas se utilicen las siete herramientas, si no que de acuerdo con las necesidades se eligen cuales ayudan a la solución de los problemas.

Los objetivos de emplear las herramientas de calidad son los siguientes:

- Identificar problemas.
- Clasificar los problemas de calidad de acuerdo con su importancia.
- Identificar las posibles causas raíz.
- Seleccionar una solución para los problemas.
- Verificar la eficiencia de la solución.

2.2.3 Diagrama de Pareto

Es imposible e impráctico pretender resolver todos los problemas de un proceso o atacar todas las causas al mismo tiempo. En este sentido, el diagrama de Pareto es un gráfico especial de barras cuyo campo de análisis o aplicación son los datos categóricos. Su objetivo es separar los problemas vitales de aquellos que son triviales (Escalante, 2008).

La idea es escoger un proyecto que pueda alcanzar la mejora con el menor esfuerzo. Esta herramienta permite determinar las prioridades, consiste en clasificar los problemas de forma decreciente. El diagrama se basa en el llamado principio de Pareto, conocido como “Ley 80-20”, que reconoce que sólo unos pocos elementos (20%) generan la mayor parte del efecto (80%) (Kenneth, 2008); el resto genera muy poco del efecto total. De la totalidad de problemas de una organización, sólo unos cuantos son realmente importantes.

Además de ayudar a seleccionar el problema que es más conveniente atacar, el diagrama de Pareto facilita la comunicación, motiva la cooperación y recuerda de

manera permanente cuál es la falla principal. El análisis de Pareto es aplicable a todo tipo de problemas: calidad, eficiencia, conservación de materiales, ahorro de energía, seguridad, etc. Otra ventaja del diagrama de Pareto es que permite evaluar objetivamente las mejoras, realizando un diagrama antes y después de las mejoras logradas con el proyecto, y así observar en qué cantidad disminuyó la altura de la barra correspondiente a la categoría seleccionada en el diagrama previamente hecho.

Una mala práctica en la gestión de las empresas es atender por reacción los problemas conforme van surgiendo, lo que hace que no se ataquen de fondo y que se sacrifique calidad por cantidad de acciones de mejora. Esta situación se corrige mediante el uso sistemático del diagrama, el cual permite centrar los esfuerzos y recursos en los problemas vitales. Además, de acuerdo con la experiencia, es más fácil tener una mejora de los problemas más vitales a los poco vitales (Besterfield, 2009). Se muestra un diagrama de Pareto en la **Figura 1.2**, en donde las barras representan los problemas o defectos y la línea verde el porcentaje acumulado de cada uno de ellos.

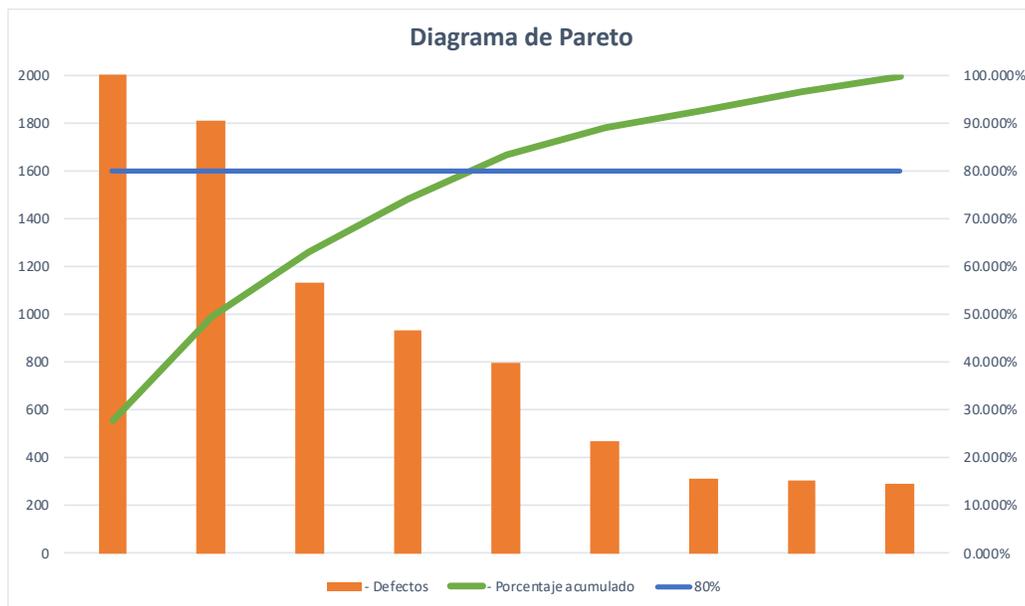


Figura 2.4 Diagrama de Pareto. Fuente: Elaboración propia (2017).

En la **Figura 1.2**, las barras indican el problema o las ocurrencias, la línea verde indica el porcentaje acumulado de las ocurrencias y la línea azul indica el cruce en donde se encuentra el 80% es así como se van a identificar en porcentaje acumulado cuál es el 80% de ocurrencias o actividades que están representando mayores problemas.

2.2.4 Diagrama de Ishikawa

El ingeniero japonés Kaoru Ishikawa desarrolló el diagrama de causa-efecto o diagrama de Ishikawa, llamado así en su honor. En 1943 lo popularizó con éxito en la Universidad de Tokio durante una de sus sesiones de capacitación a ingenieros de una empresa metalúrgica, explicándoles que varios factores pueden agruparse para interrelacionarlos en el análisis de problemas. Es un esquema que muestra las posibles causas clasificadas de un problema (Gupta y Walker, 2009).

El diagrama consta de dos lados, en el lado derecho es donde se describirá el problema a resolver mientras que en el lado izquierdo se enlistan las principales causas del problema. Su objetivo es encontrar las posibles causas raíz de un problema. En un proceso productivo, el diagrama de Ishikawa puede estar relacionado con uno o más de los factores de las 6 M's que intervienen en el proceso de fabricación (Escalante, 2008).

Las 6 M's son:

- **Métodos:** que son los procedimientos usados para la fabricación del producto.
- **Mano de obra:** El entrenamiento, los conocimientos, habilidades, características físicas, etc. del personal que realiza el proceso.
- **Materia prima:** El material que se usa para producir, se debe buscar entre los mejores proveedores que se adecuen a las necesidades del producto, contribuyendo a la calidad del proceso.
- **Medición y control:** son los instrumentos que se ocupan para evaluar los procesos y productos.
- **Medio ambiente:** es el área de trabajo, se busca proyectar un bienestar en el personal, de manera que se logre identificar y se sienta parte de la organización y se fomente un buen ambiente de trabajo entre el personal además de contar con una buena infraestructura.
- **Maquinaria y equipo:** Se debe contar con el equipo y maquinaria adecuados para los productos y procesos, además de llevar un control de mantenimiento preventivo para evitar fallas o contratiempos.

El diagrama se basa en un proceso de lluvia de ideas, en el que intervienen miembros del equipo asignado al análisis de algún problema: éstos tienen que generar ideas de manera ordenada y sin discusiones. Las ideas expresadas por los miembros del equipo deben ser anotadas para que al final de la lluvia de ideas, éstas sean analizadas para eliminar ideas repetidas, verificar que las ideas tengan relación con el problema y finalmente sean clasificadas dentro del diagrama de Ishikawa.

Al diagrama de Ishikawa también se le conoce como diagrama de causa-efecto o diagrama de espina de pescado, este último nombre por la similitud a la forma de una espina de pescado. Cuando las causas del problema no son muy obvias o fáciles de identificar a primera instancia, esta herramienta puede ser de gran ayuda para descubrir causas potenciales del problema y puede ser muy efectiva para la solución de éstas. Los diagramas de espina de pescado han tenido mucho éxito en los círculos de calidad japoneses, donde se espera la contribución de todos los niveles de trabajadores y gerentes (Arias y Minguela, 2018). En la **Figura 2.5**, se muestra un ejemplo de cómo está constituido un diagrama de Ishikawa.

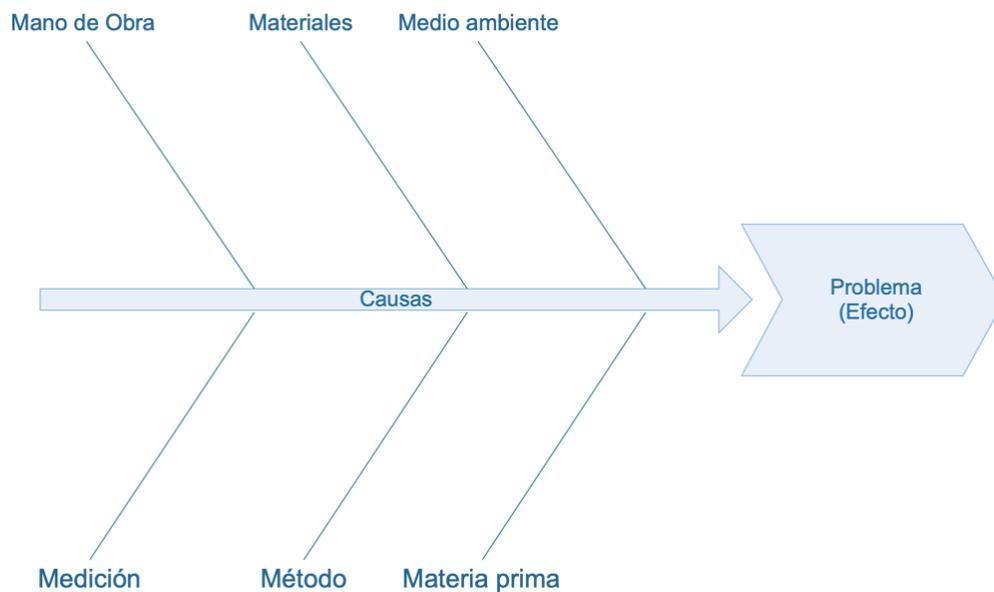


Figura 2.5 Diagrama de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia (2017).

Otra manera de hacer el diagrama es ir realizando una lluvia de ideas para cada una de las diferentes ramas e ir colocando las ideas resultantes en cada una de ellas (Escalante, 2008). El diagrama descrito anteriormente es el más común para analizar las causas de un problema, aunque hay otros tipos de diagrama de causa y efecto parecidos que son el *análisis de dispersión* y el de *análisis del proceso*. Únicamente se diferencian en la organización y el arreglo (Besterfield, 2009).

2.2.5 Pruebas de hipótesis

Una hipótesis estadística es una aseveración o conjetura con respecto a una o más poblaciones. La verdad o falsedad de una hipótesis estadística nunca se sabe con absoluta certeza, a menos que se examine a toda la población, lo cual, por supuesto, sería poco práctico en la mayoría de las situaciones. En vez de eso se toma una muestra aleatoria de la población de interés y se utilizan los datos contenidos en ella para proporcionar evidencia que respalde o no la hipótesis. La

evidencia de la muestra que es inconsistente con la hipótesis planteada conduce al rechazo de la misma. La estructura de la prueba de hipótesis se establece usando el término hipótesis nula, el cual se refiere a cualquier hipótesis que se desea probar y se denota con H_0 . El rechazo de H_0 conduce a la aceptación de una hipótesis alternativa, que se denota con H_1 . La hipótesis alternativa H_1 , por lo general, representa la pregunta que se responderá o la teoría que se probará, por lo que su especificación es muy importante (Walpole et al., 2012). Es importante recordar que las hipótesis son siempre enunciados relativos a la distribución de la población bajo estudio, no enunciados en torno a la muestra, y ésta es una afirmación con respecto a alguna característica de una población.

La decisión para aceptar o rechazar la hipótesis nula se basa en una estadística de prueba calculada teórica, a partir de los datos en una muestra aleatoria. Cuando se toma una decisión utilizando información en una muestra aleatoria, esta decisión está sujeta a error. Pueden producirse dos tipos de errores cuando se prueban hipótesis: Sí la hipótesis nula se rechaza cuando es verdadera, entonces se ha cometido un error del **Tipo I**. Sí la hipótesis nula se acepta cuando es falsa, entonces el error cometido es del **Tipo II** (Montgomery, 2004).

Existen pruebas de hipótesis unilaterales, éstas se aplican cuando la condición es “mayor que” o “menor que”, y las pruebas bilaterales cuando la condición aplicada es “diferente a”. Las pruebas de hipótesis pueden ser tanto para una muestra como para varias muestras: éstas pueden comparar las medias, las varianzas o las proporciones. Para casos en los que se tiene más de una población, se ocupa el diseño de experimentos.

2.2.5.1 Prueba de comparación de proporciones

Dentro del estudio de la calidad de un proceso, es común comparar la proporción de defectuosos antes de hacer los cambios para la mejora. En este caso hay dos parámetros binomiales de interés, y se desea probar que ellos son iguales. Las hipótesis para esta prueba son las siguientes (Walpole et al., 2012):

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 < p_2$$

Para esta prueba se utiliza una estimación de una proporción, que se calcula de la siguiente manera:

$$p_1 = \frac{x}{n} \quad (1)$$

Donde:

x = es el número de veces que ha ocurrido el evento

n = es el tamaño de la muestra

Posteriormente se calcula la proporción global, basada en las proporciones obtenidas de las muestras independientes. Se usa la ecuación 2:

$$\hat{p} = \frac{n_1 p_1 + n_2 p_2}{n_1 + n_2} \quad (2)$$

La desviación estándar de la diferencia entre las proporciones es la siguiente:

$$\sigma_{p_1 p_2} = \sqrt{\hat{p}(1 - \hat{p}) + \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)} \quad (3)$$

El estadístico z correspondiente es:

$$z_{prueba} = \frac{p_1 - p_2}{\sigma_{p_1 p_2}} \quad (4)$$

Si $z_{prueba} > z_c$ la hipótesis nula será rechazada.

2.2.5.2 Bondad de ajuste

La prueba de bondad de ajuste se ocupa cuando no se conoce la distribución de la variable aleatoria de estudio y se desea conocer qué distribución de probabilidad en particular sigue. Por ejemplo, se puede probar la hipótesis de que cierta variable X sigue la distribución normal (Montgomery, 2004).

Una de las pruebas de bondad más empleadas es la de Shapiro-Wilks. Su procedimiento de prueba requiere una muestra aleatoria de máximo 50 elementos, para la variable aleatoria cuya función de densidad de probabilidad se desconoce. Para determinar el estadístico de prueba, se ordenan los datos de menor a mayor y se obtiene la diferencia entre el primero y el último valor, el segundo y el penúltimo, el tercero y el antepenúltimo y así sucesivamente. Se obtienen los coeficientes de corrección tabulados por Shapiro y Wilks, posteriormente se corrigen los valores de las diferencias para con estos obtener b , dado por la ecuación 5.

$$b = \sum_{i=1}^n a_{in} [x_{(n-i+1)} - x_i] \quad (5)$$

Siendo a_{in} el valor de un coeficiente que se encuentra tabulado para cada tamaño de muestra y la posición i de cada observación. El estadístico de Shapiro-Wilks se calcula con la ecuación 6.

$$W = \frac{b^2}{S^2} \quad (6)$$

en donde S^2 es la varianza muestral ecuación 7.

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7)$$

Las hipótesis por probar son:

H_0 : Los datos se ajustan a una distribución normal

H_1 : Los datos no se ajustan a una distribución normal

Un buen ajuste conduce a la aceptación de H_0 . En este caso, el valor del estadístico calculado denotado con SW_c debe ser mayor al tabulado (SW_t) de $w_{(\alpha,n)}$.

2.2.6 Análisis de varianza

El análisis de varianza o ANOVA de una vía o factor se utiliza para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de tres o más grupos. En este trabajo se analizan grupos independientes (no relacionados), correspondiendo el estudio a un ANOVA de un factor entre-grupos. Si el ANOVA arroja que los grupos presentan un comportamiento distinto, se puede determinar entre qué grupos específicos existen diferencias estadísticamente significativas mediante pruebas de comparación múltiple post hoc.

El ANOVA se basa en utilizar las varianzas para determinar si las medias son diferentes es una prueba de medias. El procedimiento funciona comparando la diferencia entre las medias de grupo (entre-grupos) contra la varianza dentro de los grupos (intra-sujetos) como una forma de determinar si los grupos son distintos entre sí y dentro de sí.

De k poblaciones se seleccionan muestras aleatorias de tamaño n . Las k poblaciones se clasifican con base en un criterio único, como tratamientos o grupos distintos. El término tratamiento se utiliza para designar las diversas clasificaciones.

Se supone que las variables aleatorias son independientes, que tienen una distribución normal con la respectivas medias y que tienen una varianza común. El modelo para las observaciones está dado por la ecuación 8 (Freund John et al., 2006):

$$x_{ij} = \mu_i + e_{ij} \quad (8)$$

En la ecuación anterior, e_{ij} mide la desviación que tiene la j -ésima observación de la i -ésima muestra, con respecto a la media del tratamiento, μ_i es la media de cada uno de los tratamientos y x_{ij} denota la j -ésima observación del i -ésimo tratamiento.

La hipótesis para esta prueba es la siguiente (Walpole et al., 2012):

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ Las medias de las muestras son iguales.

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$ Las medias de las muestras son diferentes o al menos una media de una muestra es diferente a las demás medias de las otras muestras.

La prueba se basa en una comparación de dos estimaciones independientes de la varianza poblacional común σ^2 . Dichos estimadores se obtienen haciendo la partición de la variabilidad total de los datos, obtenidos mediante la sumatoria doble de:

$$\sum_i^k \sum_j^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (9)$$

Las sumas de cuadrados de interés son los siguientes:

- Suma de Cuadrados Total (SST, por sus siglas en inglés) :

$$SS_T = \sum_i^k \sum_j^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (10)$$

- Suma de los Cuadrados del Tratamiento (SCTr, por sus siglas en inglés):

$$SS_{Tr} = n \sum_i^k \sum_j^n (\bar{x}_{ij} - \bar{x})^2 \quad (11)$$

- Suma de los Cuadrados del Error (SCE, por sus siglas en inglés):

$$SSE = \sum_i^k \sum_j^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (12)$$

La Suma de los Cuadrados Total también se representar con la siguiente identidad:

$$SST = SS_{Tr} + SSE \quad (13)$$

La identidad anterior expresa las diferencias entre las medias de los tratamientos observados y la gran media, y mide la diferencia entre tratamientos. La diferencia de las observaciones dentro de un tratamiento con respecto a la media del tratamiento se debe al error aleatorio y está contenido en SS_E .

Un estimador de σ^2 , basado en $k - 1$ grados de libertad se describe por la ecuación 14:

$$S_1^2 = \frac{SST}{k - 1} \quad (14)$$

Otro estimador independiente de σ^2 , basado en $k(n - 1)$ grados de libertad, es el presentado en la ecuación 15:

$$S^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)} \quad (15)$$

El estadístico de prueba es igual a $F = \frac{s_1^2}{s^2}$. Este es un valor que sigue una distribución F con $k - 1$ y $k(n - 1)$ grados de libertad. Se tiene una prueba de una sola cola, en donde la región crítica se localiza del lado derecho de la distribución. Si $F > F_{\alpha, [k-1, k(n-1)]}$ se rechaza la hipótesis nula.

Los cálculos del análisis de varianza se resumen en la **Tabla 2.2**.

Tabla 2.2 Resumen de cálculos de ANOVA

Resumen de ANOVA					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Error medio cuadrático	F Calculada	F de tablas
Entre grupos	SS_{Tr}	$k - 1$	$s_1^2 = \frac{SS_{Tr}}{k - 1}$	$F = \frac{S_1^2}{S^2}$	$F_{\alpha, k-1, k(n-1)}$
Error	SSE	$k(n - 1)$	$S^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)}$		
Total	SST	$kn - 1$			

2.3 Six Sigma

2.3.1 Antecedentes

En la década de 1980, Motorola pasaba por una crisis de competitividad y sus resultados no reflejaban un panorama prometedor. En una ocasión, Bob Galvin, CEO de la compañía, dijo: “nuestra calidad apesta”. El problema era el nivel de calidad tan bajo que podía causar el cierre de la empresa, por lo que convocó a su personal a mejorar significativamente su calidad. En 1985 el Dr. Mikel Harry, ingeniero y estadista en la división de Motorola publicó un artículo describiendo la fiabilidad de un producto que tenía durante su proceso de fabricación. Diseñó junto con otros ingenieros de Motorola una iniciativa de calidad basada en la eliminación de causas de los problemas antes de que fuera necesario identificar y reparar los defectos. Fue así como Motorola lanzó el programa de calidad con el nombre de Six Sigma (Barba et al., 2001).

El doctor Mikel Harry captó la atención de Galvin al proponer que ya no utilizaran el promedio como forma de evaluar los resultados globales, sino la desviación estándar, ya que cuando ésta se mide representa la variación de un conjunto de datos con respecto a su media. Aplicando la respuesta anterior, en lugar de promediar buenos y malos resultados, se podría cumplir más consistentemente con la calidad requerida de los productos. En 1987 Motorola buscaba avanzar de nivel 3 Sigma (93.3% de productos dentro de especificación) a un nivel 10 veces más alto, es decir, el equivalente a un nivel 4 Sigma (99.3% dentro de especificación) en 1989.

Malcom Baldrige, secretario de economía de Estados Unidos, le presentó al presidente Reagan la propuesta de establecer el Premio Nacional de Calidad en 1987, pero poco antes de entregarlo por primera vez, Baldrige murió en un accidente y le pusieron su nombre al premio. Este premio fue entregado por primera vez a Motorola en 1988 no solo por haber logrado niveles de cuatro sigmas, sino por lograr que algunos procesos entregaran una calidad casi perfecta de 99.9996%, equivalente a Six Sigma, por lo cual el proyecto fue rebautizado con este nombre (Huerga et al., 2012). Mas adelante, otras compañías como General Electric, Lockheed Martin, Texas Instruments y Honeywell, entre otras, siguieron el ejemplo de Motorola y continuaron el desarrollo de su personal y de sus proyectos en pro de una industria más eficiente y productiva.

2.3.2 Definición

Six Sigma es un enfoque de mejora de negocios que busca encontrar y eliminar las causas de errores y defectos con herramientas de calidad y estadísticas, cuyo propósito es mejorar el nivel de desempeño de un proceso, logrando de esta manera que la organización comprenda las necesidades de sus clientes. El método Six Sigma, conocido como DMAIC, se basa en el ciclo de calidad PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar), propuesto por Deming (Herrera y Fontalvo, 2011). La filosofía Six Sigma tiene un enfoque basado en procesos. Es imperativo entonces tomar la información de las fases que componen esta estructura. Las áreas en las cuales se debe tomar información son el área de entrada al proceso, el área que integra las distintas actividades del proceso, el área de salida del proceso y el área de satisfacción del cliente.

Sería un error pensar que Six Sigma se trata de calidad en el sentido tradicional. La calidad, definida tradicionalmente como la conformidad con los requisitos internos, tiene poco que ver con Six Sigma. Esta filosofía se enfoca en ayudar a la organización a ganar más dinero al mejorar el valor y la eficiencia del cliente. Para vincular este objetivo de Six Sigma con la calidad, se requiere una nueva definición de calidad: el valor agregado por un esfuerzo productivo. Esta calidad puede expresarse como calidad potencial y calidad real. La calidad potencial es el valor agregado máximo posible conocido por unidad de entrada. La calidad real es el valor agregado actual por unidad de entrada (Pyzdek y Keller, 2010). Six Sigma se centra en los requisitos del cliente, la prevención de defectos, la reducción del tiempo del ciclo y el ahorro de costos. A diferencia de los programas de reducción de costos sin sentido que también reducen el valor y la calidad, Six Sigma identifica y elimina los costos que no proporcionan valor a los clientes: costos de desperdicio (Pyzdek y Keller, 2010).

La meta de Six Sigma, que le da el nombre, es lograr procesos con una calidad Six Sigma, es decir, que como máximo generen 3.4 defectos por millón de oportunidades. Esta meta se pretende alcanzar mediante un programa de mejora, diseñado e impulsado por la alta dirección de una organización, en el que se desarrollan los proyectos a lo largo y ancho de la organización con el objetivo de tener los procesos críticos en un nivel Six Sigma (Evans y Lindsay, 2014).

De acuerdo con Escalante (2008), la estructura de Six Sigma se compone de:

- *Champion*: Establecen los objetivos, las responsabilidades, seleccionan el proyecto y los equipos que formaran parte de él, suelen ser directores de área. Los champion tienen que eliminar barreras que puedan inhibir la implementación de los proyectos.

- *Máster Black-Belt*: Son expertos en Six Sigma de tiempo completo, es personal seleccionado que fue capacitado y tiene experiencia como Black-Belt y tiene como función coordinar y capacitar a éstos en su desarrollo como expertos en Six Sigma.
- *Black-Belt*: Persona con habilidades de liderazgo y comunicación, tienen conocimientos extensos en las técnicas y herramientas para poder aplicar la metodología, dirige a los equipos en el desarrollo del proyecto, también ayuda a capacitar a los Green-Belt. Se recomienda que esos estén enfocados de tiempo completo a su participación como líderes de proyectos Six Sigma.
- *Green-Belt*: Es una persona enfocada en tiempo parcial a actividades Six Sigma, dando apoyo a los Black-Belt, están más enfocados en sus actividades cotidianas. Sin embargo, debe conocer cómo utilizar las técnicas estadísticas y de calidad. Por lo regular los Green-Belt exitosos son promovidos a Black-Belt.

De acuerdo con Breyfogle III (1999), un Black-Belt en Six Sigma podría realizar cuatro proyectos por año y producir un mínimo de 500 mil dólares de beneficios. Six Sigma representa una métrica, una filosofía de trabajo y una meta.

2.3.3 DMAIC

La metodología Six Sigma, se caracteriza por cinco etapas concretas bien diferenciadas; estas son definir, medir, analizar, mejorar y controlar, por lo que se conoce esta metodología también por DMAIC (Felizzola y Luna, 2014) (Figura 2.6). La metodología toma un problema identificado por la empresa y utiliza una serie de herramientas y técnicas de forma lógica para llegar a soluciones viables.

De acuerdo con Hosmaotani (1992) citado por Escalante (2014), la definición del problema es la diferencia que existe entre un estado ideal y un estado real o actual. Una situación adversa puede considerarse como el nivel de desperdicio en cierta operación. Los resultados pueden minimizar o eliminar el problema, poniendo a la organización en un puesto competitivo (Sanear, 2009).

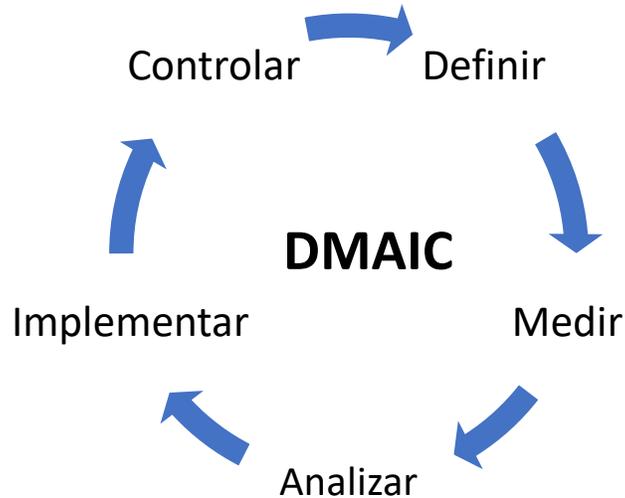


Figura 2.6 Ciclo de la metodología DMAIC. Fuente: Elaboración propia (2017).

2.3.3.1 Definir

En la etapa inicial de un proyecto se presenta la definición, la cual describe el objetivo, la justificación, el alcance, los recursos, el equipo asignado y un programa preliminar del proyecto. Esta etapa es la más importante porque es donde se establece el fundamento de la ejecución del proyecto, precisando la razón por la que se hace, los beneficios esperados y las métricas con las que se medirá su éxito. A través de un diagnóstico preliminar, la organización debe conocer e identificar las áreas susceptibles de mejora, definir las metas, objetivos y alcance del proyecto (Gutiérrez y de la Vara, 2009).

Comúnmente la fase de definir se expresa el problema de una forma simple, el objetivo, el equipo que llevará a cabo el proyecto y los factores críticos en los que se va a enfocar el proyecto. Se debe ocupar alguna herramienta como diagrama de Pareto, gráficas de control, histogramas, etc. para poder definir de forma objetiva el problema (Escalante, 2008).

2.3.3.2 Medir

El propósito de la etapa de medición es entender el estado actual del proceso y recolectar datos confiables sobre calidad, costo y velocidad; esto permite cuantificar mejor la magnitud del problema. Además, se debe mostrar evidencia de que se tiene un sistema de medición adecuado (Gutiérrez y de la Vara, 2009).

Las mediciones cobran su importancia cuando las decisiones se basan en hechos objetivos. Si una empresa fundamenta el tratamiento de la información recolectada

únicamente en técnicas estadísticas descriptivas, el análisis que se realice del proceso será superficial e implicaría toma de decisiones erradas, generando de esta manera elevados costos atribuibles a la falta de calidad.

La organización debe planificar e implementar procedimientos de seguimiento con el propósito de validar la información que toma del proceso, como la medición y evaluación del producto, la capacidad del proceso, los indicadores de gestión del proyecto y la satisfacción de los clientes externos e internos.

2.3.3.3 Analizar

La fase de analizar se enfoca en por qué ocurren los defectos o errores. El análisis del problema empieza con una comprensión fundamental del proceso, esto se puede lograr comúnmente con el uso del diagrama de flujo, un diagrama SIPOC o un mapa de flujo de calor, este último contiene todas las actividades que se llevan a cabo como el diseño, producción, entrega de bienes y el servicio al cliente.

Puede que ocurra un problema de calidad por diferentes razones como los materiales, máquinas, métodos, personal y la capacitación. La meta de esta etapa es identificar sus causas raíz y para ellos se ocupan diferentes herramientas (Evans, 2014).

Las herramientas de utilidad en esta fase son muy variadas, por ejemplo, lluvia de ideas, diagrama de Ishikawa, diagrama de Pareto de segundo nivel, estratificación, diagramas de control, mapeo de procesos, los *cinco por qué*, despliegue de la función de calidad para relacionar variables de entrada con variables de salida, diseño de experimentos, prueba de hipótesis, diagrama de dispersión, entre otras.

Las actividades por realizar en esta etapa son:

- Determinar las fuentes de variación
- Identificar el cuello de botella
- Analizar la causa raíz

2.3.3.4 Implementar

El objetivo de esta etapa es proponer e implementar soluciones que resuelvan las causas raíz; es decir, asegurarse de que se corrige o reduce el problema. Es recomendable generar diferentes alternativas de solución que atiendan las diversas causas, para ello se tienen algunas de las siguientes herramientas: lluvia de ideas, técnicas de creatividad, hojas de verificación, diseño de experimentos, poka-yoke, etc. La clave es pensar en soluciones que ataquen las causas y no el efecto.

Una vez que se generan diferentes alternativas de solución es importante evaluarlas mediante una matriz que refleje los diferentes criterios o prioridades sobre los que se debe tomar la solución.

2.3.3.5 Controlar

Cuando han sido alcanzadas las mejoras deseadas, se diseña un sistema que mantenga las mejoras logradas y se cierra el proyecto. Muchas veces esta etapa es la más dolorosa o difícil, puesto que se trata de que los cambios realizados para evaluar las acciones de mejora se vuelvan permanentes. Esto implica la participación y adaptación a los cambios de toda la gente involucrada en el proceso, por lo que se pueden presentar resistencias y complicaciones. Al final de cuentas, el reto de la etapa de control es que las mejoras soporten la prueba del tiempo.

Para llevar a buen fin esta etapa, se deben acordar acciones de control en tres niveles: proceso, documentación y monitoreo, como se explica en seguida.

Estandarizar el proceso. En este nivel se deciden acciones para asegurar las mejoras a través de cambios en los sistemas y estructuras que forman el proceso, tratando de no depender de controles manuales y de vigilancia sobre el desempeño. En otras palabras, se deben buscar cambios permanentes en los procesos y en sus métodos de operación. Aquí las ideas de los dispositivos tipo *poka-yoke* podrían resultar de utilidad.

Documentar el plan de control. Se busca trabajar para mejorar o desarrollar nuevos documentos que faciliten el apego a los procedimientos estándar de operación del proceso. La estandarización vía documentación contempla procedimientos bien escritos, videos y hojas de trabajo ilustradas. Otras alternativas para lograr la estandarización de los métodos son: la capacitación, tanto para nuevos trabajadores como para los actuales, así como, los sistemas a pruebas de errores. Algunos consejos para documentar los procedimientos son los siguientes:

- Involucrar a la gente que supervisa y aplicar los métodos.
- Probar el procedimiento tal como se documentó.
- Ser completo el procedimiento, pero conciso.
- Colocar el procedimiento donde esté disponible fácilmente.
- Bosquejar un método para actualizar los procedimientos (mejora continua).
- Poner fecha a los procedimientos.
- Desechar los procedimientos obsoletos.

Monitorear el proceso. Se deciden las mejoras durante monitoreo del proceso para que mediante éste se tenga evidencia de que el nivel de mejoras logrado se siga manteniendo. Los monitoreos se realizan sobre las entradas claves del proceso, así como sobre las variables de salida críticas. Por excelencia, las herramientas para analizar y monitorear el desempeño de un proceso son las cartas de control, pero debe asegurarse una elección y operación adecuada.

Cerrar y difundir el proyecto. El objetivo de esta última actividad es asegurarse de que el proyecto Six Sigma haya documentado los logros y sirva como herramienta de difusión para fortalecer la estrategia de la empresa. Esta difusión ayudará a fortalecer el aprendizaje y la mejora continua en la organización.

2.3.4 Métricas de Six Sigma

Se puede definir la métrica DPU (defectos por unidad), que determina el nivel de no calidad de un proceso. El DPU se calcula con la ecuación 16:

$$DPU = \frac{d}{U} \quad (16)$$

En donde:

d es el número de defectos

U es el número de unidades observadas

Se debe entender como unidad la parte o producto que se elabora en un proceso y del que por lo tanto es posible evaluar su calidad. Una desventaja de la métrica DPU es que no toma en cuenta cada unidad puede tener más de una oportunidad de error.

Las oportunidades de defecto corresponden a cualquier atributo o especificación que ofrezca una oportunidad de no satisfacer el requisito del cliente. En este sentido, se puede utilizar la métrica DPO (defectos por oportunidad), que es más completo que el DPU. Al igual que el DPU mide la no calidad de un proceso. Se calcula con la ecuación 17:

$$DPO = \frac{d}{U \times O} \quad (17)$$

En donde:

d es el número de defectos

U es el número de unidades observadas

O es el número de oportunidades de error por unidad

La métrica que se utiliza más dentro de la metodología Six Sigma cuando la característica de calidad es un atributo se conoce como DPMO, por su acrónimo de defectos por millón de oportunidades (Gutiérrez y de la Vara, 2009). Este cuantifica los defectos en un millón de oportunidades de error, y se obtiene al multiplicar los DPO por 1 millón:

$$DPMO = \frac{d}{U \times O} \times 1,000,000 \quad (18)$$

Otra forma de calcular el DPMO es tomando en cuenta únicamente los CTQ (critical-to-quality) que son los parámetros críticos de la calidad (Camison et. al., 2006):

$$DPMO = \frac{d}{U \times CTQ} \times 1,000,000 \quad (19)$$

Es importante aclarar que las variables DPU y DPMO corresponden a defectos, por lo que siguen una distribución de Poisson; esto a comparación de los defectuosos expresados en PPM (piezas por millón), que sigue una distribución binomial. Ambas variables se pueden aproximar a una distribución normal.

A partir del DPU se puede calcular el rendimiento Y del proceso, que es la probabilidad de que la distribución esté dentro de especificaciones. Para el caso analizado dentro de este trabajo, se aplica la distribución de Poisson para determinar la probabilidad de 0 fallas (Gutiérrez y de la Vara, 2009):

$$Y = e^{-DPU} \quad (20)$$

Se puede encontrar el nivel sigma a corto plazo, z_y , a partir de Y , buscando en una Tabla de distribución normal la z que corresponde a la probabilidad acumulada de Y :

$$P(z < z_y) = Y \quad \text{o} \quad P(z > z_y) = 1 - Y$$

Una vez que se obtiene el valor de tablas y suponiendo un desplazamiento de 1.5 sigmas, el nivel sigma a largo plazo del proceso está dado por la ecuación 21:

$$z = z_y + 1.5 \quad (21)$$

2.4 Simulación

Una simulación por computadora es un intento de modelar un proceso de un sistema real o hipotético con el objeto de observar, analizar y mejorar su comportamiento (Flores de la mota et al., 2013). La simulación ayuda a pronosticar el comportamiento de un sistema y de esta manera influir en su comportamiento futuro. Esta técnica ha sido usada de forma reciente para resolver problemas, en ciencias como la ingeniería, economía, medicina, ciencias sociales entre otras. El origen de la palabra “simulación” se remonta a 1940 en donde John Von Newman y Stanislaw Ulam construyeron el término Análisis de Monte Carlo, que fue un modelo matemático usado para resolver problemas nucleares. Este término fue ocupado en la Segunda Guerra Mundial para cálculos secretos que se realizaban con el fin de simular el flujo de neutrones de una bomba atómica.

La simulación computarizada fue utilizada por primera vez en la industria de defensa de EUA en los años 50. Los primeros modelos de simulación fueron construidos utilizando lenguajes de programación como FORTRAN y Run On Mainframes (Kelton et al., 2008). En los años 80 del siglo XX, un gran desarrollo de la simulación fue la aparición de computadoras personales, que la empresa Microsoft llevó hacia el entorno operativo. Instrumentos de simulación como Writness, Pro-model, Arena y Ithink mostraron modelos visuales interactivos y posibilidades de animación impresa. Estos desarrollos afectaron significativamente a la extensión del uso de los lenguajes de simulación. La primera mitad de los noventa del siglo XX aportó otro interesante desarrollo de la simulación mediante uso de programas orientados a objetos, tales como, Modsim y C ++.

Las técnicas de simulación sirven para analizar los procesos actuales (mejora y optimización) y procesos futuros (anticipación de soluciones) con el fin de obtener el diseño más eficiente con diferentes objetivos:

- Optimización de recursos.
- Validación de la inversión a realizar.
- Identificación de restricciones de proceso.
- Análisis de puntos críticos (cuellos de botella) del proceso
- Evaluación de alternativas de diseño de los procesos.

- Evaluación del diseño de instalaciones para adaptarse a la fabricación de nuevos modelos.
- Análisis de la capacidad máxima.
- Estimación de la eficiencia / productividad.
- Simulación de condiciones extremas.

La simulación permite la representación de los procesos, recursos, productos y servicios en un modelo dinámico computarizado, que, cuando simula, reproduce las operaciones del negocio, discurre a través de los acontecimientos en un tiempo reducido mientras despliega un cuadro animado del curso del trabajo. Debido a que el software de la simulación tiene en cuenta las estadísticas de los elementos del modelo, el comportamiento métrico puede ser evaluado mediante el análisis de los datos output del modelo. La ventaja de la simulación es que se realizan experimentos sin poner en riesgo a la empresa a errores reales (Flores de la Mota et al., 2013). Un ejemplo es que los bancos han estudiado el cambio de su sistema de filas múltiples por una fila única y esto sin necesidad de experimentar con los clientes, ya que si no funciona como se espera, podría tener consecuencias desagradables.

Para poder hablar sobre *sistema*, se da una breve definición de lo que se entiende por esto. Un sistema es un conjunto de entidades u objetos que interactúan entre sí en busca de un objetivo (Guasach et al., 2005). Por ejemplo, en un estudio en donde se desea conocer el número de cajeros necesarios para un supermercado, los clientes y los cajeros serían los objetos del sistema. El *estado* de un sistema puede ser definido como el conjunto mínimo de variables necesarias para caracterizar o describir todos aquellos aspectos de interés del sistema en un cierto instante de tiempo. Estas variables se denominan variables de estado.

Los sistemas pueden clasificarse en (Guasch et al., 2005):

- *Sistemas continuos*: Las variables de estado del sistema evolucionan de modo continuo a lo largo del tiempo. Típicamente, los modelos de simulación continua involucran ecuaciones diferenciales que determinan las relaciones de las tasas de cambios de las variables de estado en el tiempo, como, por ejemplo, la temperatura en una habitación.
- *Sistemas discretos*: Se caracterizan en que las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en un cierto instante o secuencia de instantes, y permanecen constantes el resto del tiempo. El sistema obedece a un patrón periódico.
- *Sistemas orientados a eventos discretos*: al igual que los sistemas discretos, se caracterizan en que las propiedades del sistema cambian

únicamente en una secuencia de instantes de tiempo y se puede considerar que permanecen constantes el resto del tiempo. La secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema presenta un cambio obedece a un patrón aleatorio.

- *Sistemas combinados*: aquellos que combinan subsistemas cuyas dinámicas responden a características continuas y discretas. Es el caso de los sistemas que poseen componentes que deben ser necesariamente modelados según alguno de dichos enfoques específicos. Existen tres tipos de interacciones entre las variables de estado de este tipo de simulaciones:
 1. Un evento discreto causa un cambio discreto en el valor de una variable de estado continua.
 2. Un evento discreto causa que la relación que gobierna una variable de estado continua cambie en un instante de tiempo en particular.
 3. Una variable de estado continua de punto de partida causa que un evento discreto ocurra, o sea, programado

Los resultados de una réplica del modelo únicamente representan una muestra del comportamiento real del sistema, así surge la pregunta de ¿Cuántas réplicas son necesarias para tener un resultado cercano a la realidad? Un método esencial para mejorar la fiabilidad de los resultados es ejecutar más de una réplica independiente.

El primer paso es determinar un número de réplicas que servirá de prueba piloto. Este número preliminar se define a criterio del analista y los resultados obtenidos ayudan a determinar algunos parámetros necesarios como la media y la desviación estándar. Los parámetros obtenidos al ejecutar el modelo sirven para determinar el tamaño de experimentos de la simulación. La distribución por utilizar depende del número de replicas adoptado. La forma de calcularlo se muestra en las ecuaciones 22 y 23 (Torres Vega, 2016).

Si $n < 30$

$$N = \left(\frac{S_n}{\varepsilon} t_{\alpha/2, n-1} \right)^2 \quad (22)$$

Si $n > 30$

$$N = \left(\frac{S_n}{\varepsilon} z_{\alpha/2, n-1} \right)^2 \quad (23)$$

En donde:

- N : número de replicas necesarias.
- n : número de replicas preliminares.
- ε : margen de error.
- $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$: valor de tablas de una distribución t de Student.
- $Z_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$: valor de tablas de una distribución normal.

CAPITULO 3 Metodología aplicada

Para resolver el problema presentado se hizo uso de la metodología DMAIC (**D**efinir, **M**edir, **A**nalizar, **I**mplementar y **C**ontrolar) en una línea de producción de la empresa PRODDI. Se desarrollaron las cinco fases de la metodología.

En primer lugar, se determinó en qué área de la empresa se debía llevar a cabo la mejora. Una vez se tomó una decisión, se comenzó a observar el proceso y se realizaron las entrevistas.

El siguiente paso fue obtener los datos históricos del proceso, como: el volumen de producción y los defectos generados. Con estos datos se continuó a la etapa de análisis, donde se ocupó el diagrama de Pareto para identificar los principales problemas y posteriormente se realizó un diagrama de Ishikawa para buscar las causas raíz correspondientes. En la fase de mejora, se aplicaron mejoras al proceso para disminuir las fallas de producto y la variabilidad del proceso. La última etapa fue la de control, en donde se buscó que permanecieran los cambios implementados.

Se evaluó las mejoras del proceso con un cuadro de costo-beneficio, en el que se muestra cuál fue el impacto monetario que se logró con la aplicación de la metodología. Por último, se identificó una área de oportunidad para el departamento de mantenimiento, ya que el último problema que se identificó fue la descompostura de las máquinas. Para mejorar esta situación, se llevó a cabo una simulación del proceso para observar el posible comportamiento de la producción si éstas no fallaran y proponer implementar una metodología de mantenimiento productivo total (TPM, por sus siglas en inglés).

3.1 Etapas de la metodología

Como en la mayoría de las PYMES, PRODDI no tiene un área encargada de revisar, estructurar y mejorar sus procesos. Para aplicar la metodología DMAIC es fundamental conocer la situación actual de la empresa en el área productiva, con la finalidad de saber qué herramientas de calidad serán necesarias aplicar para estructurar de una mejor forma sus procesos y ver los posibles escenarios que se presenten durante dicha propuesta. Este diagnóstico corresponde a la detección del problema.

3.1.1 Definir el problema

El primer paso fue acercarse con el gerente general de la empresa para conocer los problemas observados en los procesos. Se le propuso la implementación del

proyecto, exponiéndole las ventajas que se obtienen al adoptar una metodología para tener una mejora continua en su proceso. Se creó un equipo para analizar y conocer los puntos de vista de los operadores, para llegar a los resultados óptimos, así como para tener un control sobre los cambios que se fueran a efectuar sobre el proceso.

El problema de mayor importancia se presentó en la línea de producción de Base Bracket, que es una pieza que sirve para el ensamble de un espejo automotriz. Esta pieza se encuentra en el interior del espejo, funcionando como unión entre la puerta y el espejo lateral. La pieza no es visible debido a que queda cubierta por la carcasa.

En esta línea de producción se generaba al inicio de este estudio un alto porcentaje de rechazo de piezas, una mezcla de material y la tardía identificación de los defectos, impactando en los costos de operación de la empresa. Otro problema que se identificó fue que el objetivo de producción no se cumplía diariamente por diferentes razones, generando problemas con el departamento de logística, atrasando sus entregas. Las operaciones a las que era sometida la pieza se muestran en la **Figura 3.1**.

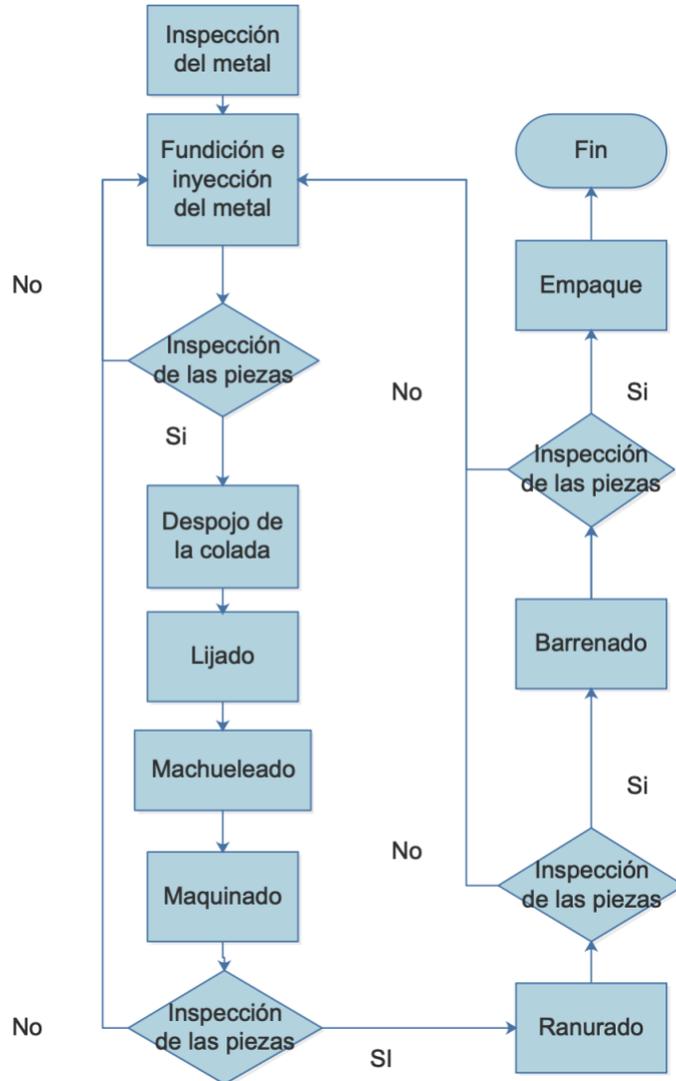


Figura 3.1 Diagrama de flujo del Base Bracket. Fuente: Elaboración propia (2017).

Descripción de los componentes del diagrama de flujo de la **Figura 3.1**.

Fundición del metal: este proceso consiste en el colado del material a altas temperaturas y permite una mejor maniobrabilidad del metal para iniciar el proceso de fabricación de las piezas metálicas.

Inyección: este proceso consiste depositar el metal fundido dentro de un molde. Este proceso termina al retirar la pieza inyectada dentro del molde, dejando que esta se enfríe y pase a su siguiente operación quitar la merma de la colada.

Despojo de colada: proceso que se compone por la separación de las piezas inyectadas, quitando la unión que existe entre ambas, llamada colada. La merma es nuevamente fundida.

Ranurado: el proceso radica en mecanizar las ranuras en las piezas o canales de determinada anchura y profundidad.

Lija: este proceso consiste en utilizar lijadoras neumáticas para quitar la rebaba.

Machueleado: comienza al utilizar una herramienta de corte (machuelo), para generar la rosa interior.

Maquinado: en este proceso se realiza el acabado superficial de la pieza, con limas neumáticas y charrascas para retirar el excedente de la rebaba, y con destapadores se abren los orificios.

Barrenado: es la operación de realizar una perforación en la pieza con una broca.

Inspección de piezas: consiste en que el departamento de calidad verifique que todas las piezas hayan pasado por cada una de las operaciones descritas anteriormente y se encuentren dentro de las especificaciones.

Se definirá cada una de las etapas de la metodología, para dar a conocer cómo se desarrolló el proyecto y cómo se logró un óptimo resultado, siendo el objetivo disminuir el porcentaje de rechazo y aumentar la productividad de la línea de trabajo.

En esta primera etapa de la metodología se identificó que la línea del Base Bracket es una de las más importantes en la producción, además de presentar mayores problemas y generar reclamos de los clientes, en cuanto a inconformidades e incumplimiento por la fabricación de piezas de mala calidad.

Los objetivos al detectar el problema fueron:

- Identificar las áreas de oportunidad del proceso.
- Conocer los principales problemas que presentó la pieza.
- Delimitar las actividades que se estudiaron para realizar la mejora.

Se tuvo una entrevista con la líder de maquinado, los responsables de los procesos (barrenado, ranurado y machueleado) y 10 operadores de maquinado, en donde se les preguntó: ¿Qué operación realizan? ¿Cuál es su responsabilidad? ¿Qué problemas tienen? ¿Hacen algo para resolverlo? Los trabajadores expresaron los problemas y necesidades que visualizaban al realizar su trabajo y se registraron las respuestas de estas preguntas, se clasificaron y se compararon para ver si coincidían o no. La información anterior sirvió para conocer la situación del proceso y para definir la problemática real en la línea de producción.

Posteriormente, se observó el proceso para detectar las fallas, conocer las operaciones de cada una de las áreas, identificar el procesamiento de las piezas, el comportamiento cotidiano de la gente y verificar los problemas que ellos expresaron con anterioridad. También se tuvo una entrevista con el jefe de logística para conocer la situación actual de las entregas y saber si hay un problema en el área de producción ya que, durante la entrevista, el gerente hizo la observación de que no se alcanzaba el objetivo de producción diario, lo que provocaba que a los trabajadores se les pagara tiempo extra y lo cubrieran en sábados y domingos.

Se buscó recolectar y organizar los datos cuantitativos con ayuda de los registros de la empresa para conocer cómo se ha desarrollado de forma histórica la producción, así como, cuáles eran los defectos más comunes y cómo se han comportado su distribución a través del tiempo (constante, creciente o variable); sin embargo, se encontró la limitante de que la empresa no contaba con una base de datos de fallas.

3.1.2 Medir

A partir del mes de agosto del 2017, se comenzaron a tomar los datos de producción y el rechazo de las piezas, para obtener información real y confiable del proceso. Estos datos se registraron en la base de datos de la empresa para comenzar a documentar la información de manera completa y poder comenzar a crear datos históricos completos para consultarse en cualquier momento y conocer la evolución de los mismos. En la base de datos de la empresa se captura la información como: el nombre de la persona de captura, la fecha de captura, la fecha del reporte, la descripción del defecto, el número de defectos, la clave interna de la pieza, la clave del operador que captura, el proceso donde se encuentra, el área en donde se genera y la producción.

La base de datos de la empresa se crea en Excel y hay una persona encargada de administrarla. La empresa cuenta con dos base de datos: en una se captura la producción y en la otra el rechazo de piezas. Ambas se vinculan en una Tabla y gráfica para ser observada por la alta dirección. En la **Tabla 3.1** se muestra un extracto de la base de datos de producción, la cual cuenta con 7,501 registros.

Implementación de la metodología DMAIC en una empresa metalmecánica
Ing. José Jesús Guillén Martínez

Tabla 3.1 Base de datos producción.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Mes	Fecha	Fecha Captura	Clave	Pieza	Produccion	Clave operador	Nombre Operador	Proceso
2	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	264	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
3	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	264	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
4	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	264	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
5	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	264	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
6	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	264	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
7	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	264	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
8	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	264	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
9	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	240	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
10	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	216	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
11	enero	03-ene-18	04-ene-18	3457	Base Bracket RH	144	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
12	enero	03-ene-18	04-ene-18	3457	Base Bracket RH	168	2934	Torres Pimentel Cristian	Quality Wall
13	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	181	3021	Garcia Vazquez Pablo Ernesto	Linea S/P
14	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	181	3021	Garcia Vazquez Pablo Ernesto	Linea S/P
15	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	181	3021	Garcia Vazquez Pablo Ernesto	Linea S/P
16	enero	03-ene-18	04-ene-18	3455	Base Bracket LH	181	3021	Garcia Vazquez Pablo Ernesto	Linea S/P

En la **Tabla 3.1** se observa que los datos que contiene la base de datos de producción incluyen las piezas que se producen por hora, esto con el objetivo de estudiar si se está logrando el objetivo de producción por hora.

En la **Tabla 3.2** se muestra la base de datos que es ocupada para la información de piezas rechazadas.

Tabla 3.2 Base de datos de piezas rechazadas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Mes	FECHA	CLAVE PIEZA	NOMBRE PIEZA	Total Piezas	Area	ID EMPLEADO	NOMBRE EMPLEADO	DEFECTO
2	enero	02/01/17	3457	Base Bracket RH	5	Maquinado	3062	Martinez Rojas Cristina	Golpe
3	enero	02/01/17	3457	Base Bracket RH	1	Maquinado	3062	Martinez Rojas Cristina	Ranura
4	enero	02/01/17	3457	Base Bracket RH	15	Fundicion	3062	Martinez Rojas Cristina	Poro
5	enero	02/01/17	3457	Base Bracket RH	1	Fundicion	3062	Martinez Rojas Cristina	Falta de llenado
6	enero	02/01/17	3458	Base Bracket RH	5	Fundicion	3062	Martinez Rojas Cristina	Fuera de especificacion Fun
7	enero	02/01/17	3456	Base Bracket LH	7	Fundicion	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Poro
8	enero	02/01/17	3456	Base Bracket LH	3	Maquinado	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Golpe
9	enero	02/01/17	3456	Base Bracket LH	10	Acabado	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Falta de pintura
10	enero	02/01/17	3456	Base Bracket LH	5	Fundicion	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Poro
11	enero	02/01/17	3458	Base Bracket RH	7	Fundicion	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Fuera especificacion Fun
12	enero	02/01/17	3456	Base Bracket LH	6	Fundicion	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Fuera especificacion Fun
13	enero	02/01/17	3456	Base Bracket LH	10	Fundicion	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Poro
14	enero	02/01/17	3456	Base Bracket LH	3	Fundicion	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Fuera especificacion Fun
15	enero	02/01/17	3456	Base Bracket LH	28	Maquinado	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Golpe
16	enero	03/01/17	3458	Base Bracket RH	12	Maquinado	3059	Ramirez Saldivar Brandon	Barreno

En la tabla anterior, se puede observar que en la base de datos de piezas rechazadas se agrega el área de donde es ocasionado este defecto. Al momento de preguntar la razón, la respuesta del responsable fue que es para poder aplicar mejoras en el departamento; sin embargo, no se estaba utilizando la información cuando se realizó este estudio.

Por último, se tiene la representación de los datos en una gráfica de barras, que muestra un resumen de ambas tablas para uso de la alta dirección y por los jefes de área. Esta gráfica se muestra en la **Figura 3.2**.

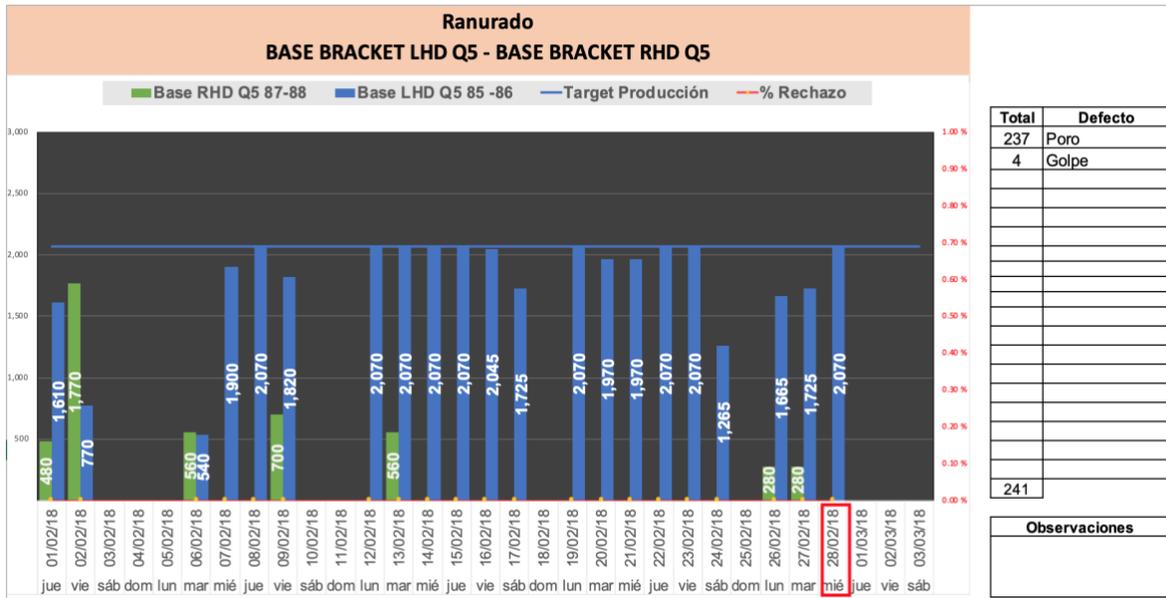


Figura 3.2 Gráfico de producción y rechazo. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 3.2** se observa la forma en que se presentan los reportes de producción, ejemplificando el proceso de ranurado. Cabe mencionar que se presenta una gráfica por proceso: barrenado, machueleadado, ranurado y maquinado. La gráfica presenta las piezas que se producen por día y el objetivo de producción. El rechazo de piezas se indican en la tabla y un cuadro de observaciones en el que los jefes de área colocan el porqué no se cumplió con el objetivo o la razón del exceso de rechazo de piezas.

Con los datos medidos, se realizó una tabla que muestra los defectos y la cantidad que se presentó de cada uno de ellos. Esta información se resumió en un diagrama de Pareto, con el objetivo de identificar los errores más repetitivos y que representan el 80% del total de ellos.

3.1.3 Analizar

En esta etapa fue fundamental tener el resultado de la medición y tener un manejo adecuado de los datos para tener el conocimiento acerca de la situación en la que se encuentra el proceso. El diagrama de Pareto ayudó de forma objetiva y gráfica a priorizar los defectos y sirvió para que se evaluaran posteriormente las mejoras que se efectuaron, comparando la situación de antes y después del proyecto. El objetivo de esta etapa fue conocer la estabilidad del proceso para la producción de piezas dentro de especificación y establecer las posibles causas raíz que generó la variación del proceso. En esta etapa se analizó por un lado el proceso y por otro lado la causa de la falla más común.

- **Análisis de proceso:**

Trasladar los productos de un lado a otro dentro de las instalaciones de la empresa no se traduce en un cambio significativo para el cliente, pero si implica un costo, e incluso pone en riesgo la integridad del producto. Por lo anterior se hizo un análisis sobre el proceso en su flujo y *layout* de la planta para buscar una mejora sobre él, para así disminuir los movimientos innecesarios y cruces de material evitando los accidentes. También se analizó la reubicación de las máquinas para tener un mejor orden de los procesos y una oportuna detección de defectos, ahorrando costos por operaciones que no agregan valor al detectarse en piezas dañadas o fuera de especificaciones.

- **Análisis de falla:**

Se analizó el defecto de mayor importancia, buscando la o las actividades que causan la falla en la pieza o el proceso a través del diagrama de Ishikawa. A partir de las posibles causas raíz detectadas, se propusieron acciones correctivas para la eliminación o disminución del defecto estudiado. Se utilizó el método de las 6 M's de calidad para desarrollar el diagrama.

3.1.4 Implementar

En esta etapa fueron implementadas las propuestas de mejora para atacar los problemas analizados en la etapa anterior, ya sea eliminando el defecto, disminuyendo la variabilidad u optimizando las actividades. Mediante la implementación de la mejora, se buscó ahorrar los costos de la empresa.

El analista debe entender la causa-raíz de los problemas observados y analizados para poder solucionarlos implementando las mejoras. Esta fue una etapa creativa, ya que las soluciones a veces no son obvias; por lo tanto, se debe ser cuidadoso al buscar la forma de mejorar y analizar varias opciones antes de actuar, para seleccionar la más útil y factible. Una vez implementadas las mejoras, se analiza el impacto que éstas tuvieron, comparando los datos anteriores con el resultado de esta etapa mediante pruebas de hipótesis.

3.1.5 Control

Esta fase es la más compleja ya que se buscó que las mejoras fueran estandarizadas para asegurar que se mantuvieran. Se buscó documentar los nuevos métodos, con una verificación continua de las acciones implementadas y se

supervisó que se llevaran a cabo. El reto de esta etapa fue que las mejoras superarán la prueba a través tiempo. Lo que se pretendió en esta etapa es que, estabilizado el nuevo proceso, no regresarán a las variaciones anteriores y sobre éste nuevo, trabajar para buscar nuevas mejoras a través del tiempo. También se buscó un cambio en la cultura de los operadores, ya que por costumbre del proceso anterior pueden reincidir en errores cometidos en el pasado. Se debe tener un control en el proceso para el periodo de adaptación de los cambios y observar cómo se responde ante ello.

3.2 Simulación

Después de la aplicación de la metodología DMAIC se utilizó el software Simio (Simio 11, 2019) para realizar la simulación de la línea de maquinado, ya que se observaron problemas con las máquinas y la existencia de paros de producción, teniendo como consecuencia no alcanzar el objetivo de la producción.

Se plantearon 4 escenarios diferentes para analizar el posible comportamiento de la línea de maquinado, incluyendo los paros por fallas de máquina. Para calcular el tiempo de fallas y de reparación de las máquinas se ocuparon el tiempo medio entre fallos (*MTBF*) y el tiempo medio de reparaciones (*MTTR*).

Para obtener el *MTBF* y el *MTTR* es necesario determinar el tiempo total de funcionamiento de las máquinas y el número de fallas. El tiempo total de funcionamiento o *TTF* de la máquina se calcula con la ecuación 24.

$$TTF = \text{tiempo total disponible} - \text{tiempo total de inactividad} \quad (24)$$

El tiempo total disponible es el tiempo que la máquina puede utilizarse para la actividad destinada, mientras que el tiempo total de inactividad es el tiempo que la máquina por alguna falla esta inoperable. Tomando esto en cuenta, la ecuación para calcular el tiempo medio entre fallos, o mejor conocido como *MTBF*, se da en la ecuación 25.

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{número de fallas}} \quad (25)$$

Otro indicador importante para el análisis de fallo de mantenimiento es el tiempo medio entre reparaciones o *MTTR*; este indicador permite conocer la importancia de las fallas que se producen en una máquina, considerando el tiempo medio de su reparación. Se calcula con la ecuación 26.

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de inactividad}}{\text{número de fallas}} \quad (26)$$

En el primer escenario se planteó la situación real del proceso, en que se tomó en cuenta el paro de línea de maquinado por fallos tanto en las máquinas de barrenado como en la de machueleado. En el segundo escenario, únicamente se programó la falla de la máquina machueleadora mientras que en el tercer escenario se consideró únicamente la falla de la máquina barrenadora. El cuarto escenario se programó de acuerdo con la situación ideal, en donde ninguna de las dos máquinas falla. Este escenario tiene el objetivo de observar y analizar el beneficio de evitar estos paros imprevistos y proponer la implementación de una metodología para el mantenimiento preventivo.

CAPITULO 4 Resultados de la aplicación de la metodología

4.1 Etapa 1

4.1.1 Definición del problema

De las entrevistas realizadas a los operadores, se detectaron los siguientes problemas en la línea:

- El flujo del material no tiene un orden bien definido
- Existe una alta probabilidad de mezclar material ya procesado con piezas a los que les falta alguna operación.
- Se observa una pérdida de tiempo en la inspección final de calidad, antes de la entrega de las piezas para su envío a pintura. Como que cada uno de los procesos tiene su propia inspección, este paso resulta redundante.

La líder expresó que después de que la pieza pasa por el maquilado, tiene que ser ranurada o barrenada; sin embargo, la decisión de en qué orden se llevarán a cabo esos procesos depende de cuál proceso necesita material o de que las máquinas no estn paradas por presentar fallas.

Con la finalidad de detectar áreas de oportunidad, se revisa el proceso, confirmando que el no contar con un flujo establecido tiene como resultado la siguiente problemática:

- Falta de trazabilidad e identificación del material.
- Movimientos excesivos del material.
- Cruce de material entre operaciones, que puede generar la mezcla de estos.
- La falta de orden en el flujo ocasiona que se elija de forma subjetiva a cuál de las últimas operaciones se debe enviar el material.
- La inspección final de calidad no aporta nada al valor del proceso.

Una de las causas principales por las que se rechazan las piezas es el defecto de *poro*, generando una disminución en la producción y una elevación de los costos, ya que se rechazan piezas a las que se les han aplicado ya todas las operaciones. El problema es la tardía identificación del defecto mencionado, porque solamente se detecta al momento de ranurar, siendo esta una de las últimas operaciones del proceso.

El jefe de logística comenta en la entrevista que las entregas del material por parte del departamento de maquinado son tardías, lo que incumple con el requerimiento

del cliente. Sin embargo, después de que el proceso de maquinado termina la pieza, se va al proceso de pintura, regresa a la planta al departamento de calidad o *quality wall*, quien realiza una inspección final de todas las partes críticas de la pieza.

El departamento de calidad está encontrando piezas defectuosas mermando aún más la cantidad de piezas entregadas por producción, provocando entregas tardías al cliente por falta de material.

El diagnóstico preliminar es:

- El flujo de material después del despojo de colada es inadecuado, crea confusión y mezcla de materiales y genera costos elevados en la pieza.
- Es necesario realizar la medición de los defectos presentados en las piezas, para conocer la situación de cada uno de ellos, y saber cuál es el que más impacta, y analizar el diagrama de causa-raíz para encontrar una solución.

4.1.2 Medición

Entre los problemas encontrados en esta etapa, se puede mencionar que la definición de los defectos no está estandarizada, por lo que se describe de diferente manera dependiendo el área. Incluso se observa que los mismos inspectores de calidad ocupan diferentes términos para definir el mismo defecto, lo cual genera confusión al momento de capturarlo en la base de datos.

Otro problema es la falta de registros continuos en el tiempo, ya que hay demasiada rotación de personal responsable y cuando no estaba la persona a cargo, no se capturaban los reportes diariamente, ocasionando pérdida de información. Por la razón anterior, se decidió recolectar para este proyecto de mejora datos a partir del mes de agosto del 2017, para comenzar a documentar de forma completa y continua. Los resultados obtenidos sobre los defectos se muestran en la **Tabla 4.1**; se ocupa el estilo itálico para los defectos que serán analizados y atendidos en este trabajo de investigación.

Tabla 4.1 Medición de defectos.

Defecto	Agosto	Septiembre	Total general
<i>Poro</i>	37	2304	2341
<i>Golpe</i>	296	1517	1813
Posición	294	838	1132
Chueca	601	333	934
Distancia	206	592	798
Pruebas /Ajustes	0	467	467
Pasa NoGo	151	162	313
Ajuste	0	306	306
Barreno grande	65	228	293
<i>Clip chueco</i>	0	273	273
<i>Sin barreno</i>	157	87	244
<i>Sin ranura</i>	100	113	213
Mal limado	21	173	194
Arranque de Material	16	176	192
Rota	22	104	126
Despostillado	0	125	125
Mal lijado	0	106	106
Fisura	0	95	95
Cuerda lisa	54	9	63
Falta de llenado	3	51	54
Fisura (Machueleado)	30	8	38
Barreno chico	11	16	27
Barrenado	0	12	12
Chueco (inyección)	11	0	11
Fisura Troquel	0	10	10
Sin Cuerda	3	5	8
Cuerda	0	7	7
Deforme	0	5	5
Falta de Pintura	0	2	2
No Pasa Go	0	1	1

Se construyó un diagrama de Pareto con los datos de los defectos que se recopilaron. Para utilizar esta herramienta es necesario tener datos correctos y completos acerca de los defectos, para así detectar el 20% de defectos que generan el 80% del rechazo y poder analizar estos para buscar su solución.

Se toman en cuenta los datos a partir de agosto y septiembre del 2017 para generar el diagrama de Pareto. Con esto se pretende priorizar de forma gráfica las actividades que están afectando más en la productividad y los costos, para después buscar su causa-raíz y encontrarles una solución.

En la **Tabla 4.2** se observa que los tipos de defecto, así como el porcentaje de ocurrencia en agosto y septiembre 2017. Para hacer los cálculos, se hace la suma de los defectos individualmente y el conjunto de ellos. Posteriormente, para sacar el porcentaje, se hace la división individual del total de cada uno de ellos entre el total general, dando como resultado el porcentaje que representa a cada uno. Después se ordenan los datos con relación al porcentaje de mayor a menor y en la columna del lado derecho y se suman los porcentajes para obtener el porcentaje acumulado. Por último, con estos datos se realiza el diagrama de Pareto que se muestra en la **Figura 4.1**.

Tabla 4.2 Defectos de producción para realizar el diagrama de Pareto.

Suma de Total Defectos	Agosto	Septiembre	Total general	Total Acumulado	% Porcentaje	% acumulado
<i>Poro</i>	31	2064	2095	2095	26.43%	26.43%
<i>Golpe</i>	256	1116	1372	3467	17.31%	43.74%
Posición	281	608	889	4237	11.22%	54.96%
Chueca	511	259	770	5126	9.71%	64.67%
Distancia	120	471	591	5717	7.46%	72.13%
Ajuste		379	379	6096	4.78%	76.91%
Pasa NoGo	109	141	250	6346	3.15%	80.07%
Barreno grande	56	170	226	6559	2.85%	82.92%
<i>Sin ranura</i>	100	113	213	6785	2.69%	85.60%
<i>Clip chueco</i>		195	195	6980	2.46%	88.06%
<i>Sin barreno</i>	59	87	146	7125	1.84%	89.91%
Mal limado	16	129	145	7248	1.83%	91.74%
Arranque de Material	11	112	123	7394	1.55%	93.29%
Despostillado		104	104	7540	1.31%	94.60%
Rota	19	72	91	7686	1.15%	95.75%
Fisura		90	90	7832	1.14%	96.88%
Cuerda lisa	51	8	59	7978	0.74%	97.63%
Falta de llenado	2	42	44	8124	0.56%	98.18%
Mal lijado		38	38	8270	0.48%	98.66%
Fisura (Machueleado)	27	5	32	8416	0.40%	99.07%
Barreno chico	10	13	23	8562	0.29%	99.36%
Barrenado		12	12	8708	0.15%	99.51%
Chueco (inyección)	11		11	8854	0.14%	99.65%
Fisura Troquel		10	10	9000	0.13%	99.77%
Sin Cuerda	3	4	7	9146	0.09%	99.86%
Deforme		5	5	9292	0.06%	99.92%
Cuerda		3	3	9438	0.04%	99.96%
Falta de Pintura		2	2	9584	0.03%	99.99%
No Pasa Go		1	1	9730	0.01%	100.00%
Total general	1673	6253	7926			

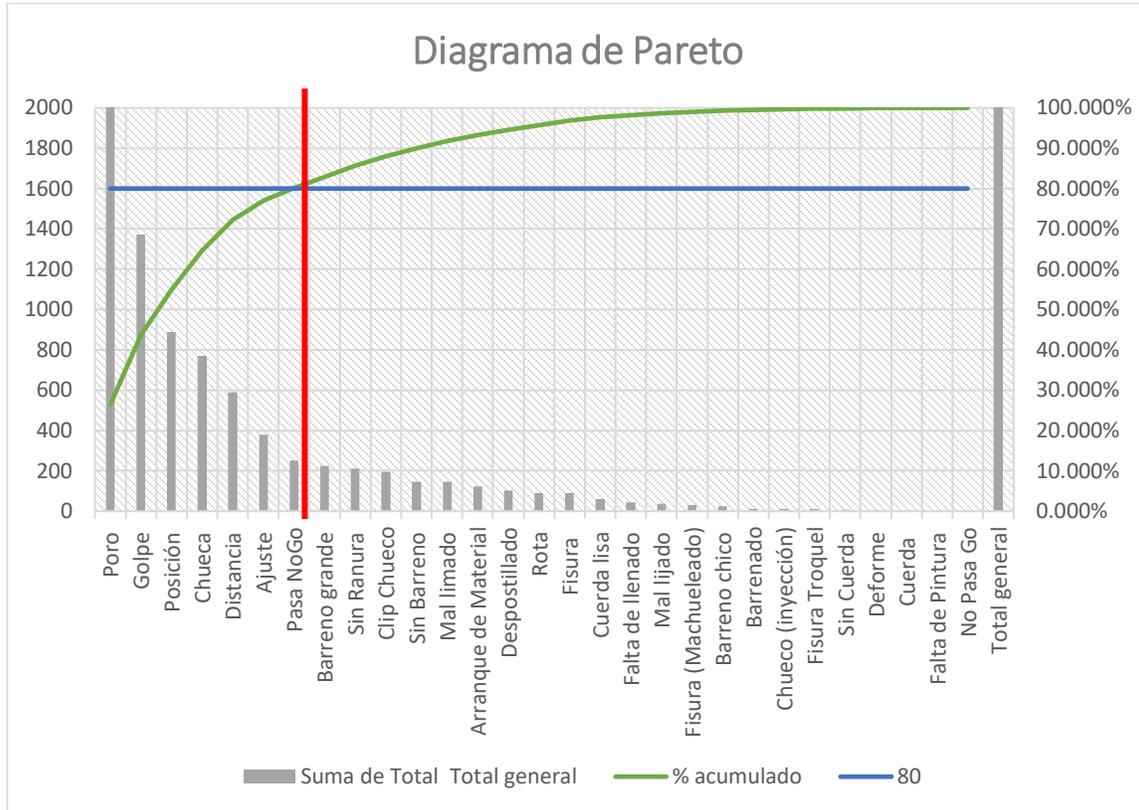


Figura 4.1 Diagrama de Pareto. Fuente: Elaboración propia (2017).

La **Tabla 4.2** y el diagrama de Pareto de la **Figura 4.1** muestran que los defectos que están generando el 80% del rechazo total están conformados por: *poro*, *golpe*, *posición*, *chueca*, *distancia*, *ajuste* y *pasa no go*, en ese orden.

De acuerdo con los defectos señalados anteriormente, se comienza a buscar soluciones para los dos más importantes, siendo el defecto de *poro* (como está señalado en el marco teórico de defectos de fundición, conocido como porosidad) y el *golpe* que se presenta en la parte superior del tourillón de la pieza.

Los datos recopilados para conocer el comportamiento de la producción de maquinado se toman a partir de septiembre del 2017, debido a que en el mes de agosto hubo más de un turno. Como recordatorio, el número de piezas trabajadas en maquinado no es el mismo de las entregadas a almacén, aún se deben restar los defectos por ranurado y barrenado, ya que estas actividades son las últimas en el proceso. En la **Figura 4.2** se muestra el número total de piezas trabajadas por mes.

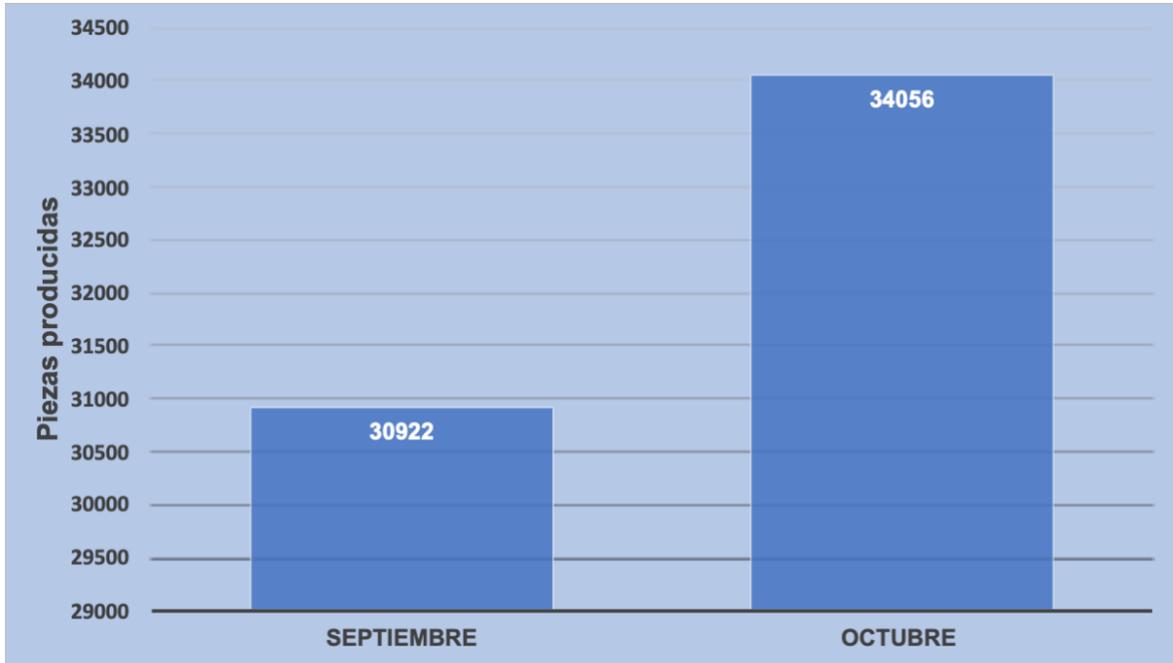


Figura 4.2 Piezas producidas en maquinado. Fuente: Elaboración propia (2017).

A la cantidad de piezas ya trabajadas por maquinado, se les resta el total de los defectos de barreno y ranura. Con esto se observa la cifra de piezas que en estos meses se entregaron a almacén para enviar a pintura. Los resultados se muestran en la **Figura 4.3**.

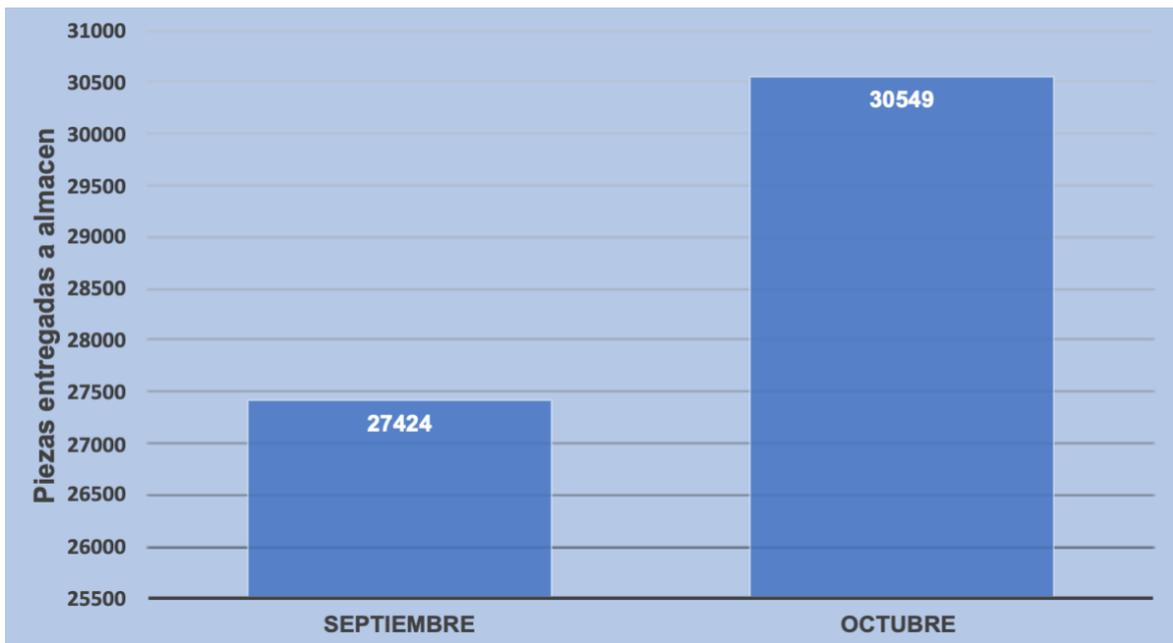


Figura 4.3 Piezas entregadas a almacén. Fuente: Elaboración propia (2017).

Comparando los valores de la **Figura 4.2** de piezas trabajadas en maquinado con la **Figura 4.3** de piezas entregadas a almacén, se observa que existe aproximadamente un 10% de merma en los procesos de ranura y barreno. Esto quiere decir que el 10% del trabajo anterior es desperdiciado, generando costos.

4.1.3 Análisis

4.1.3.1 Análisis del proceso

Se realizó un diagrama de espagueti para identificar las operaciones por las que pasa la pieza e identificar cuáles son las posibles áreas de oportunidad y definir un flujo de material adecuado.

La producción no es en línea, sino que la pieza pasa por distintas estaciones de trabajo, donde se le aplican diversas operaciones. Se estudia la distribución (*layout*) de la planta para analizar los movimientos que tiene la pieza y para observar si es posible aplicar alguna mejora, ya sea con una mejor distribución o un mejor flujo. El *layout* cuenta con las escalas de los equipos y las áreas destinadas para cada máquina, como se muestra en la **Figura 4.4**.

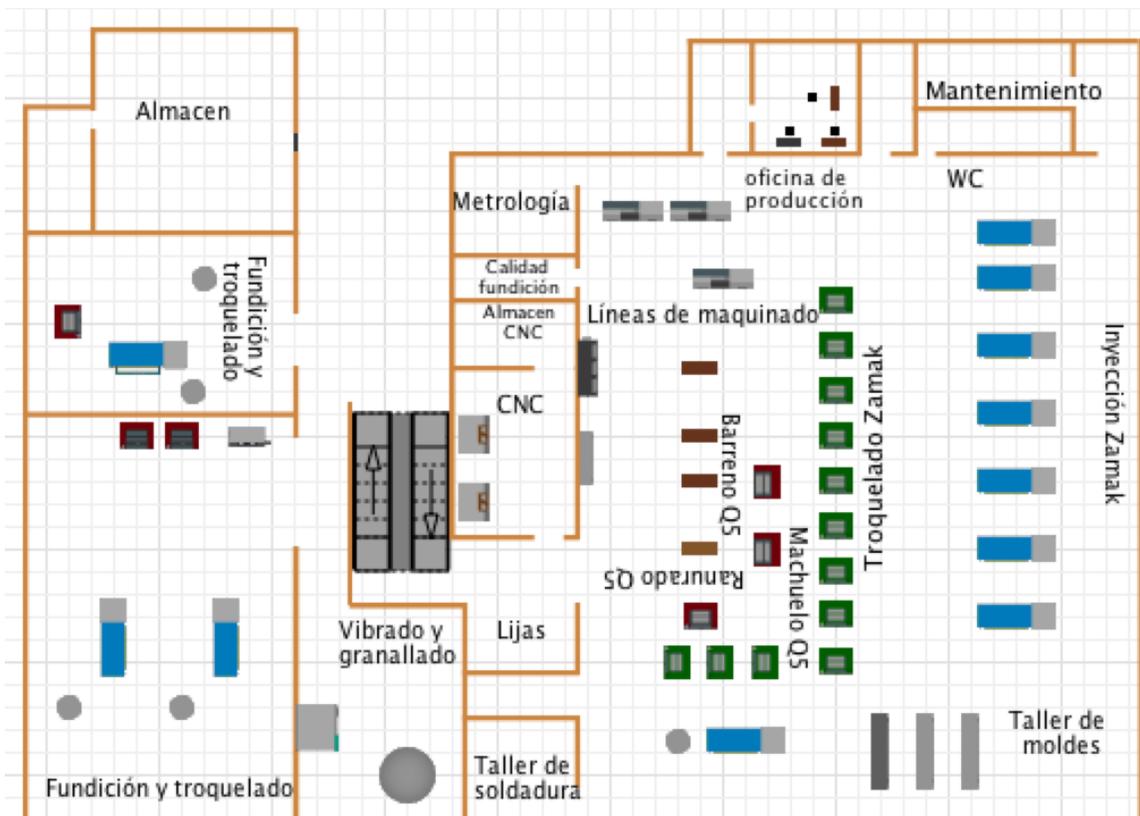


Figura 4.4 Layout de la planta de producción. Fuente: Elaboración propia (2017).

Retomando uno de los principales problemas a analizar, como es el flujo del material, se estudia el flujo de la pieza para proponer un rediseño de orden del proceso y eliminar movimientos innecesarios. También se busca una mejor trazabilidad del producto y de sus procesos.

El rediseño del orden del proceso se realiza sin modificar los objetivos de producción; se busca que este nuevo flujo tenga un impacto positivo en la productividad, así como un orden claro y definido de la secuencia de las actividades. Este rediseño evita tomar decisiones de último momento sobre qué operación sigue, lo que pudiera provocar la omisión de alguna de ellas. En la **Figura 4.5** se muestra un diagrama de espagueti, en el que se observa el orden del proceso que presenta el Base Bracket Q5 antes de la intervención.

FLUJO ACTUAL DE MATERIAL

N	Operación
1	Fundición
2	Despojo de colada
3	Lijas
4	Machueleado
5	Línea
6	Ranurado
7	Barrenado
8	Liberación

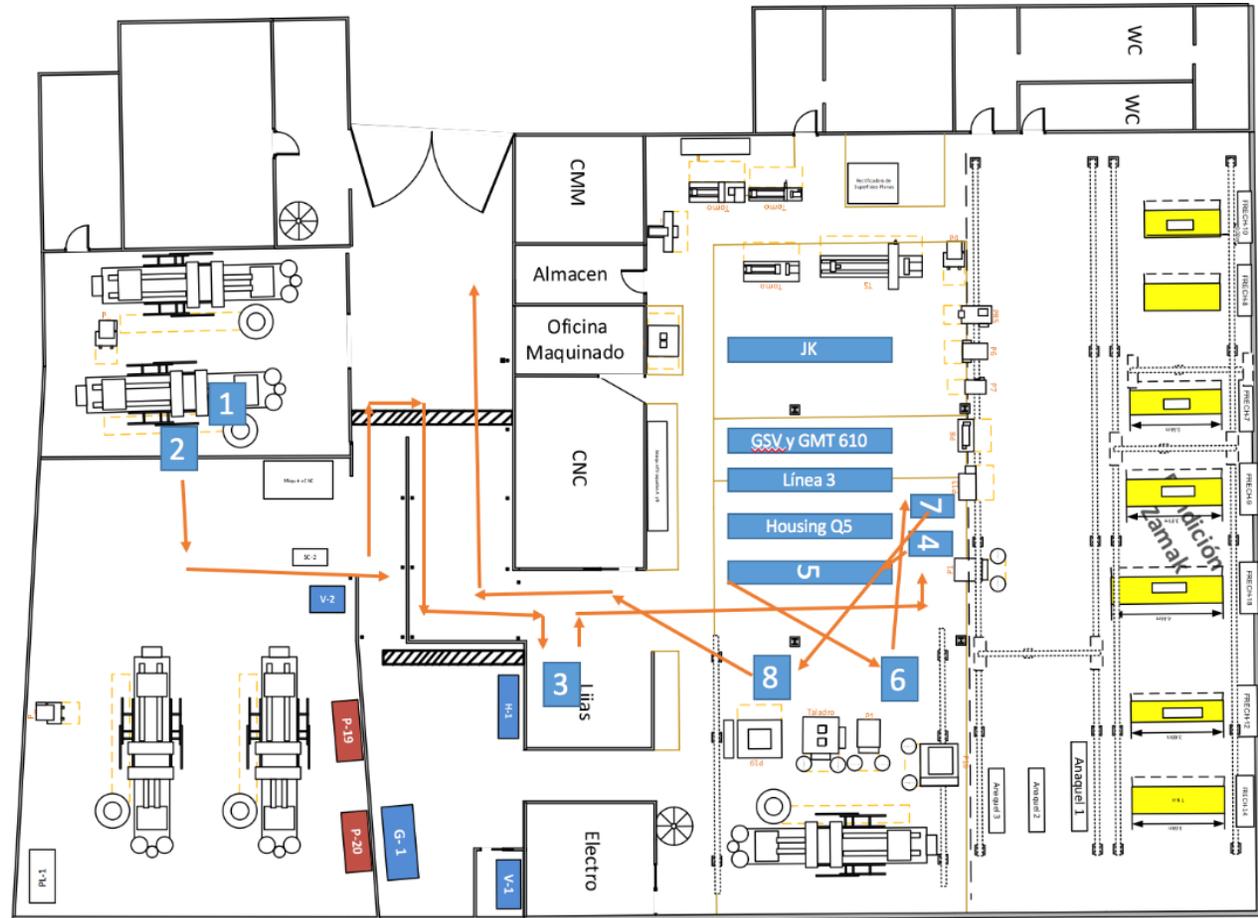


Figura 4.5 Diagrama de espagueti que muestra el flujo del Base Bracket Q5.
 Fuente: Elaboración propia (2017).

En la **Figura 4.5** se observan todas las operaciones a la que es sometida la pieza Base Bracket Q5. Al analizar el diagrama de espaguetti y el área de trabajo se logra ver varias ineficiencias en el flujo de esta pieza:

- Existen cruces entre actividades, los cuales pueden tener como consecuencia la contaminación de material, así como, accidentes del personal si estos las realizan simultáneamente.
- En la parte final del proceso hay una selección aleatoria entre los procesos 6 y 7, por falta de una definición clara de la secuencia a seguir. Esto es difícil de representar en el diagrama de espaguetti.
- El número 8 corresponde a la liberación adicional de calidad al final de la línea. Como se dijo arriba, esta inspección es innecesario ya que la maquinado, machuelo, barreno y ranura ya cuentan con una inspección de calidad. Esta última no agrega valor al producto y únicamente genera costos en la pieza.

Se propone colocar los procesos de maquinado que más rechazo generan al principio de la secuencia, para que los defectos sean detectados de manera oportuna y la pieza defectuosa no continúe el proceso sin agregar valor y generando costos adicionales.

De acuerdo con los defectos observados en el diagrama de Pareto se observa que el defecto de *poro* (**Figura 4.6**) ocupa el primer lugar e impacta directamente en la productividad de todas las piezas trabajadas. La única forma de detectarlo es ranurando la pieza, pero esta operación es una de las últimas de la secuencia, por lo que conviene adelantarlo. Además, no existe una comunicación con el supervisor de fundición sobre este defecto y la única forma de controlarlo es modificando los parámetros de la máquina de inyección.



Figura 4.6 Pieza con poros. Fuente: Elaboración propia (2017).

Se observa que a un costado de la máquina de inyección hay un espacio, donde se puede colocar la máquina ranuradora. De esta forma se detecta oportunamente el defecto y la comunicación será inmediata con el supervisor de fundición, para reportar el problema tomando así las acciones necesarias. Para ocupar el espacio mencionado es necesario mover 5 moldes obsoletos al taller de moldes, para colocar ahí la máquina. El espacio antes mencionado y los moldes se muestran en la **Figura 4.7**.



Figura 4.7 Espacio para colocar la máquina ranuradora. Fuente: Elaboración propia (2017).

El problema del flujo está impactando directamente en la cantidad de piezas que son entregadas al almacén (**Figuras 4.2 y 4.3**).

4.1.3.2 Análisis de falla

El siguiente defecto que se analiza es el *golpe* y se usa el diagrama de Ishikawa que se muestra en la Figura 4.8, para encontrar cuál o cuáles son las posibles causas o actividades que lo generan. Se utiliza el diagrama de Ishikawa como herramienta para definir las variables que están provocando que la pieza no esté dentro de especificación o bien generando un defecto que es posible eliminar.

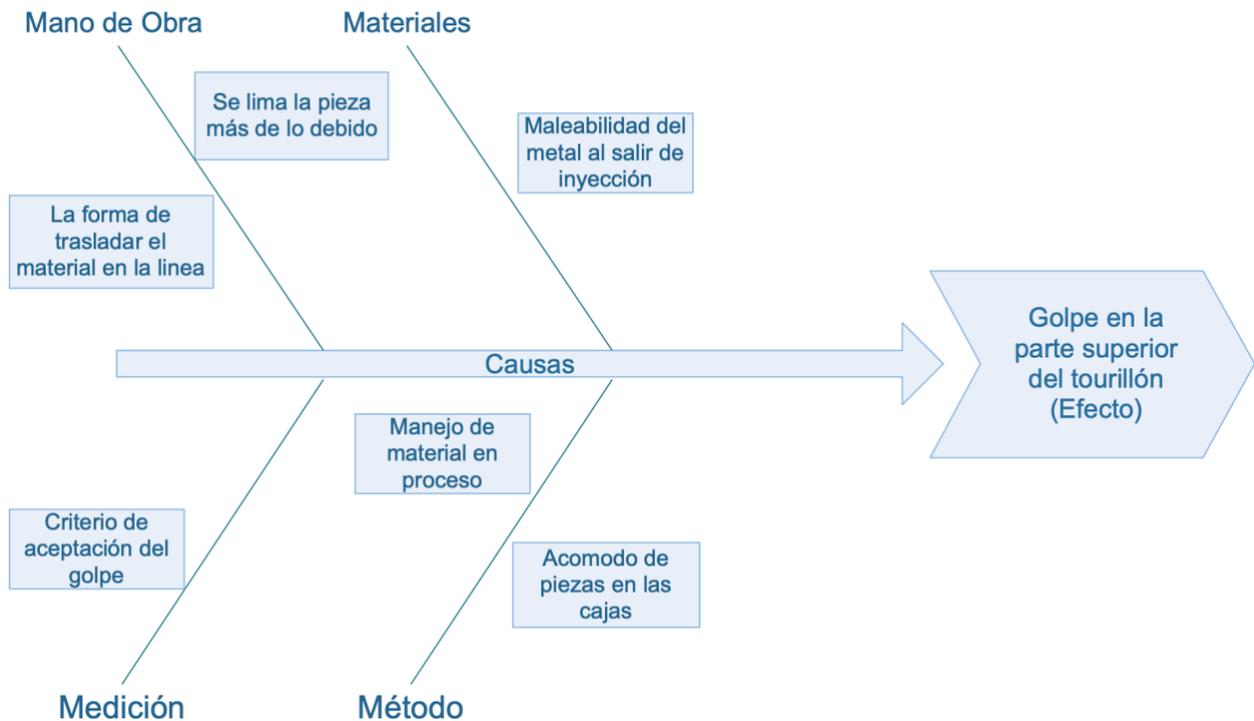


Figura 4.8 Diagrama de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia (2017).

Para realizar el diagrama se ocupan 4 de las 6 M's, se omitieron medio ambiente y materia prima, ya que ninguno de estos dos conceptos tiene una causa potencial para el fallo de la pieza. En las 4 M's restantes se colocan las causas que, con ayuda del equipo y la lluvia de ideas fueron generadas, son las que probablemente están provocando el *golpe*.

Las probables causas raíz del problema son las siguientes:

1. Se observa que en **la forma de trasladar la pieza** al maquinado existen pequeños movimientos entre cada una de sus estaciones lo que ocasiona que las piezas se golpeen entre sí, como se muestra en la **Figura 4.9**. Se necesitan eliminar estos almacenamientos temporales en la maquinado, ya

que los movimientos innecesarios de los operadores y las piezas acumuladas en cada estación evitan una producción eficiente y mayores tiempos de operación.



Figura 4.9 Área de maquinado. Fuente: Elaboración propia (2017).

2. Una de las operaciones de la pieza consiste en limar la rebaba de la parte superior del tourillón y la probabilidad de que se **lime de más la pieza** en esta zona es muy alta, lo que genera que esta se trabaje más en algún sector de la pieza, ocasionando una marca.
3. Al salir de la máquina de inyección, por la alta temperatura con la que sale la pieza, el metal cuenta con **mayor maleabilidad**. Es probable que, al acomodar las piezas en las tarimas para su enfriamiento, estas tengan contacto y por la misma maleabilidad generen con más facilidad un *golpe* en ellas.
4. Cuando se libera la pieza, los inspectores de calidad no tienen una capacitación o un criterio estandarizado sobre la aceptación o rechazo de este defecto. A pesar de contar con un *gauge go* hay golpes que, aunque el *gauge* entre en la pieza, los inspectores lo están desechando, o golpes que en el área de producción son aceptados, en el departamento de calidad son rechazados y es por esta **diferencia de criterios entre los inspectores**.
5. Después de la operación llamada *despojado de colada*, el **manejo de material** se hace por medio de cajas de plástico sin ninguna protección en el interior de ellas. Las cajas en las cuales es transportado el material se muestran en la **Figura 4.10**.



Figura 4.10 Cajas para transportar el material.
Fuente: Elaboración propia (2017).

6. **La manera de acomodar las piezas** en la caja para su traslado está dejando la parte del tourillón expuesta y al apilarse las cajas, se aplastan las piezas. También las piezas tienen juego dentro de la caja, lo que provoca en su movimiento choque de tourillón con tourillón, lo cual ocasiona el *golpe* en el traslado entre cada proceso. Se debe tomar en cuenta que existen varios movimientos entre las operaciones. En las **Figuras 4.11 y 4.12** se muestra la forma en la que las piezas son acomodadas en las cajas.



Figura 4.11 Acomodo de piezas vista lateral. Fuente: Elaboración propia (2017).



Figura 4.12 Acomodo de piezas vista superior. Fuente: Elaboración propia (2017).

4.1.4 Implementación

A continuación, se describen las mejoras que se llevaron a cabo. Para evitar que el *poro* se detecte al final de la secuencia y en busca de un óptimo manejo de material, se redefinió el flujo del proceso para tener una distribución de máquinas más eficiente. El nuevo diagrama de flujo se muestra en **Figura 4.13** (recordando el diagrama de flujo original, **Figura 3.1**) y tiene como primera operación el ranurado de la pieza, evitando la toma de decisiones en el último proceso.

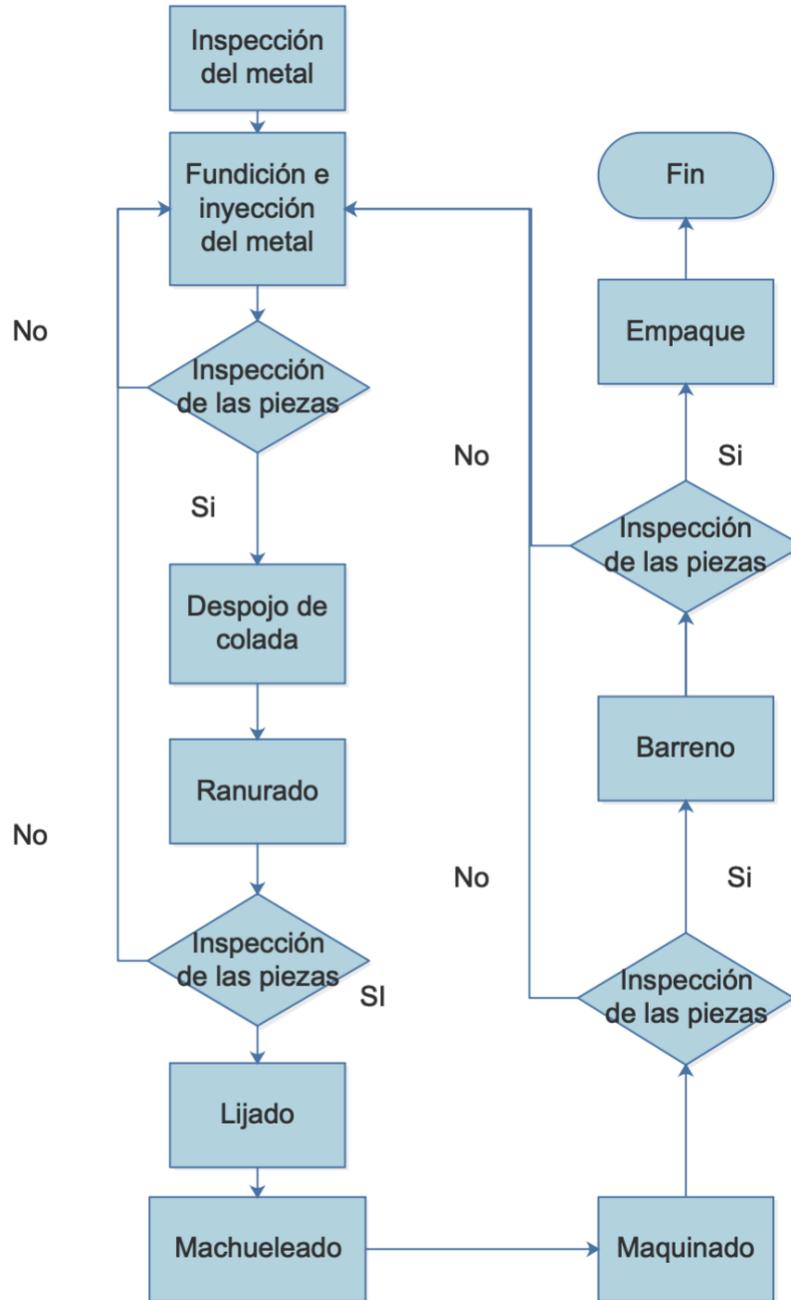


Figura 4.13 Diagrama de flujo propuesto Fuente: Elaboración propia (2017).

En la nueva distribución, se mueve la máquina de ranurado cerca de la máquina de inyección, para que los operadores tengan una comunicación inmediata del estado en que inyecta la pieza con el supervisor de fundición. También se evita de esta forma la contaminación del material, ya que la máquina ranuradora está muy cerca de la mesa de trabajo y de la machueleadora y el cruce de personal con material en el área, previniendo accidentes. Asimismo, se evita la toma de decisión de los operadores para saber a cuál operación continua el material. En la **Figura 4.14** se muestra la máquina de ranurado para llevar a cabo el nuevo flujo de material.



Figura 4.14 Máquina ranuradora en su nueva ubicación. Fuente: Elaboración propia (2017).

El nuevo flujo se puede observar en el diagrama de espaguetti de la **Figura 4.15**. En él se eliminan los cruces de material y el orden de las operaciones se encuentra bien definido. También se elimina la última inspección extra de calidad que generaba mayores costos.

Flujo de material nuevo

N	Operación
1	Fundición
2	Despojo de colada
3	Ranurado
4	Lijas
5	Machueado
6	Línea
7	Barrenado

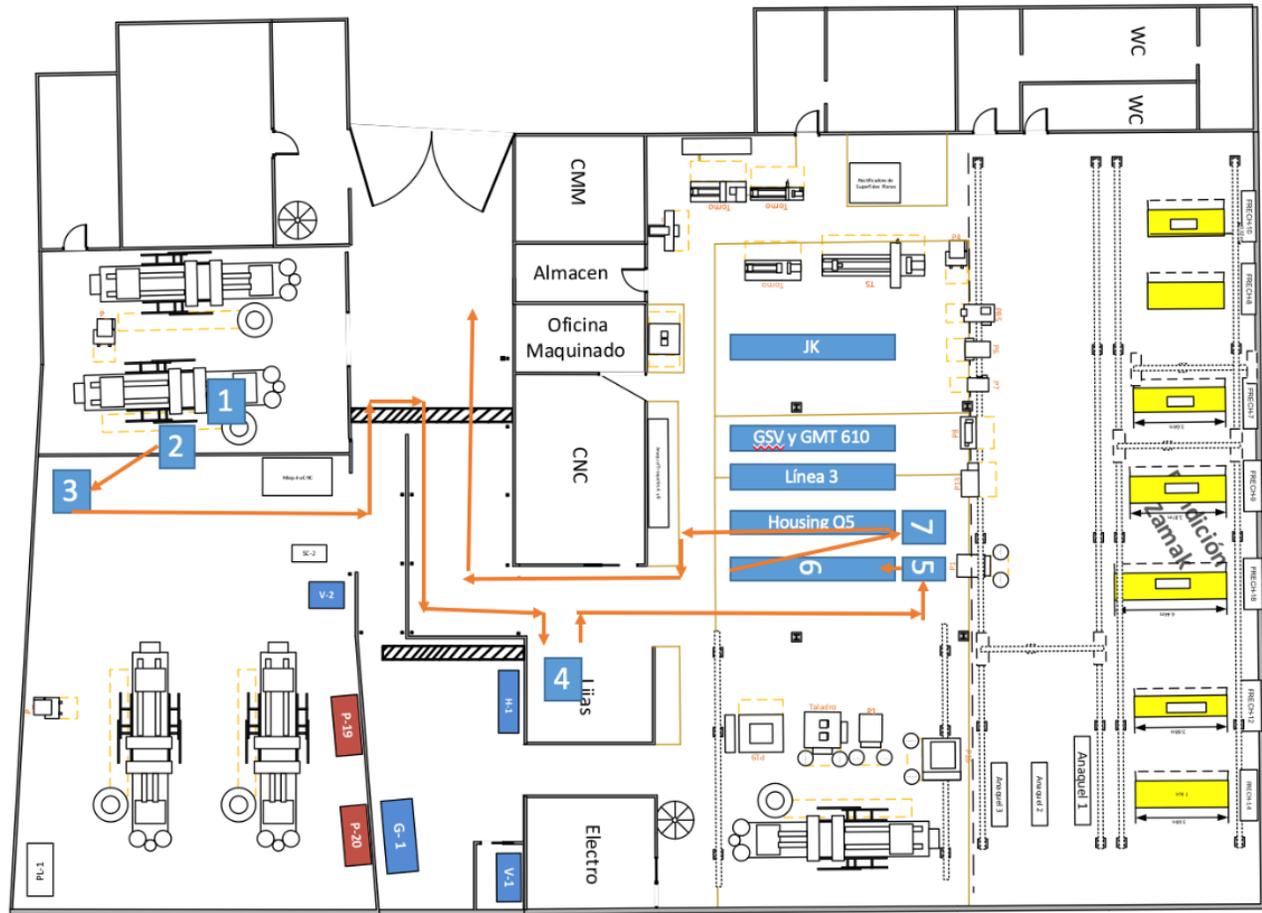


Figura 4.15 Flujo propuesto del Base Bracket Q5. Fuente: Elaboración propia (2017).

El segundo defecto identificado con el diagrama de Pareto es el *golpe* y con el diagrama de Ishikawa se identificaron las diferentes causas raíz. La primera se genera por el acomodo inadecuado de las piezas en las cajas, así que se busca una manera de acomodarlas de tal forma que el tourillón no quede expuesto y no haya fricciones o roces entre las piezas dentro de la caja. Las cajas contienen las mismas 80 piezas, al igual que como eran colocadas anteriormente. En la **Figura 4.16** se muestra el nuevo acomodo.



Figura 4.16 Mejora en el acomodo de las piezas en las cajas. Fuente: Elaboración propia (2017).

Con el nuevo acomodo de las piezas se puede observar que el tourillón de la pieza no queda expuesto como estaba anteriormente, tampoco quedan encontrados entre ellos, evitando así que choquen entre sí.

La siguiente causa raíz se encuentra en cómo está conformada la línea de maquinado. Esta consiste en una secuencia de módulos, que son mesas en donde trabajan dos operadores realizando la misma operación. Entre cada dos módulos se colocan cajas para trasladar las piezas entre un módulo y otro. Esto genera pequeños traslados del material, en el cual, al momento de pasar la pieza de una caja a otra, las piezas se golpean. Esto también provoca un exceso de movimientos entre cada una de las operaciones. En consecuencia, hay un mayor riesgo de dañar el material por ser un proceso manual y no automatizado.

Se cambia la mesa de trabajo de estaciones por una mesa lineal, en la que los operadores tienen que mover la pieza deslizándola a la siguiente operación, evitando así dejar caer las piezas dentro de las cajas como se hacía anteriormente. El nuevo diseño de maquinado se muestra en la **Figura 4.17**.



Figura 4.17 Nuevo diseño de la mesa de maquinado.
Fuente: Elaboración propia (2017).

4.1.5 Control

En la etapa de control se busca que todos los cambios efectuados en el proceso continúen y no de regrese a los errores anteriores, por lo que se capacita a todo el personal sobre el nuevo acomodo de las piezas y se hace responsable al líder de maquinado de supervisar el movimiento del material. Esta actividad es de las más complicadas, ya que son muchos los operadores que intervienen en el maquinado.

En el área de maquinado se les explica a la líder y a los operadores la razón por la que se debe deslizar la pieza en lugar de levantarla y pasarla, y se supervisa que los operadores no tengan cajas entre estaciones para acumular el material, de manera que exista un flujo continuo del mismo.

Se colocan tarjetas viajeras (**Figuras 4.18 y 4.19**) en las cajas, en ellas los líderes de proceso escriben su nombre si ya realizaron su operación y de esta forma puedan identificar qué operaciones ya tiene la pieza.

Un ejemplo de la tarjeta viajera se muestra en las **Figuras 4.18 y 4.19**.

TARJETA VIAJERA (RASTREABILIDAD)

Pieza: Base Bracket LHD RH Q5 Clave: 3456
Lote: 1712123156-02
Contenedor de Cliente: Ficosa North America Cantidad total (Lote)

Nº	Operación	Objetivo por hora	Operario	Fecha	Cantidad
1	Fundición	60	Felipe T	17-0-18	210
2	Despojo de colada	150			
3	Lijado	280	Guadalupe	08-01-19	80
4	Ranurado	230			
5	Machueleado	280			
6	Barreanado	200			
7	Línea S/P	220			
8	Quality Wall	120			
9	INSPECCION Y EMPAQUE S/P	160			
10					
11					

Observaciones:

PEPMA01-F01
F. emisión formato: 18/09/2012
Revisión formato: 00

Figura 4.18 Tarjeta viajera de trazabilidad del producto. Fuente: Elaboración propia (2017).



Figura 4.19 Tarjeta viajera dentro de la caja de Base Bracket Q5. Fuente: Elaboración propia (2017).

4.1.6 Resultados de la primera etapa

Los cambios de la primera etapa son:

- El acomodo de las piezas en las cajas para transportarlas.
- Nueva mesa de trabajo en el maquinado.
- El cambio del flujo del material.

Con los cambios anteriores, se obtiene una disminución significativa en el defecto de *golpe*. Este no se elimina por completo, debido a que los movimientos siguen

siendo largos y el material se acumula en un lugar, porque la máquina de fundición trabaja tres turnos por día mientras que en maquinado únicamente se cuenta con un turno diario.

El número de rechazo por *golpe* se puede ver en la **Figura 4.20** y muestra su comportamiento a partir de las mejoras que se realizaron en el mes de octubre. Durante los meses de octubre y noviembre se tiene una reducción, destacando que en el mes de noviembre se cambia la mesa de trabajo para ayudar a disminuir este defecto.

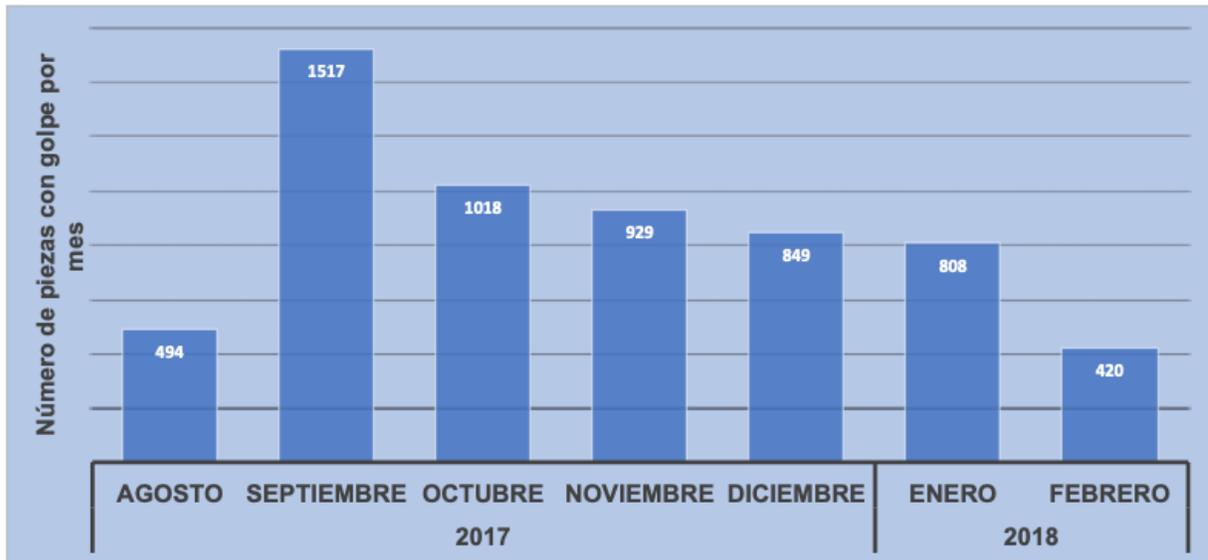


Figura 4.20 Gráfico del comportamiento de piezas con golpe. Fuente: Elaboración propia (2018).

En diciembre y enero hay exceso de movimientos, ya que se realiza el inventario y se hace limpieza en la planta, como consecuencia se incrementa nuevamente el defecto. Sin embargo, se continua monitoreando y en febrero disminuye el número de piezas con *golpe*.

En la **Figura 4.21** se observa el comportamiento del número de piezas rechazadas por *clip chueco*. Al igual que en la **Figura 4.20**, se observa que a partir de las mejoras implementadas el defecto comienza a disminuir. El exceso de movimientos en diciembre y enero incrementó considerablemente la cifra de piezas con *clip chueco*; sin embargo, se debe seguir monitoreando para comprobar que las mejoras sean efectivas.

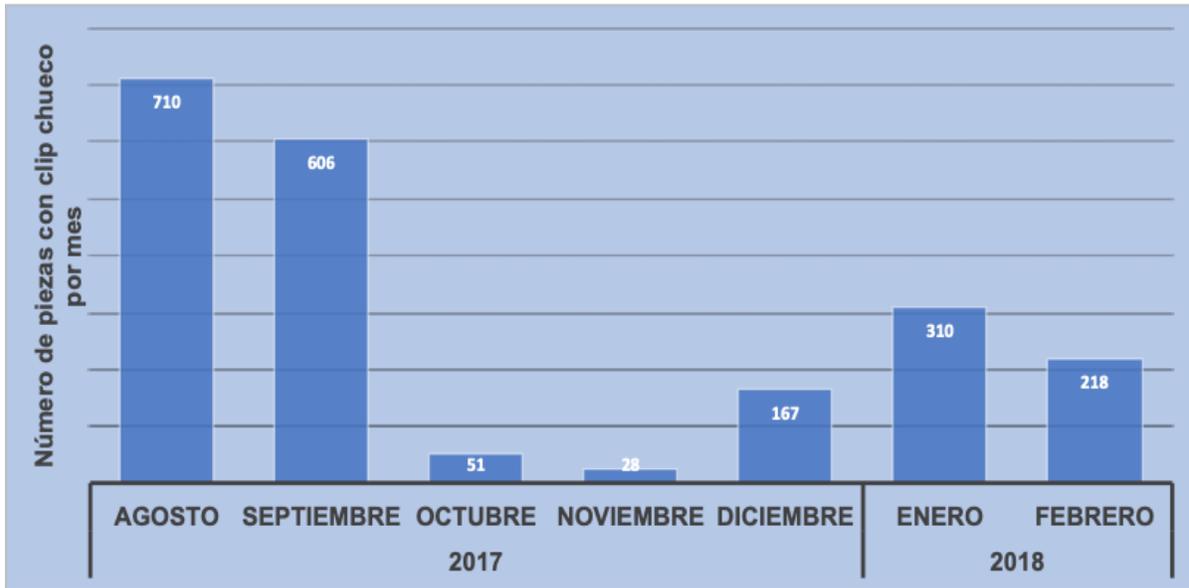


Figura 4.21 Gráfico del comportamiento de piezas con clip chueco. Fuente: Elaboración propia (2018).

Otro resultado positivo debido al cambio de flujo y el movimiento de la máquina, es que se tiene un mejor control en el flujo del material, es decir, se tiene un orden establecido que permite identificar en qué operación se encuentra la pieza y cuál le falta. Gracias a la estandarización y claridad del nuevo flujo, se evita la omisión de alguna de las dos actividades (barrenado y ranurado). El problema fue detectado por las entrevistas a los operarios, que indicaron que no se contaba con un flujo definido entre estas dos actividades, y se podía enviar la pieza primera a cualquiera de las dos actividades y olvidarse del otro.

La **Figura 4.22** muestra el efecto del cambio sobre las piezas sin ranura; se observa que al cambiar la operación de ranura al principio se logró disminuir la exclusión de esta operación en las piezas y eliminar casi por completo el problema de enviar piezas con el defecto *sin ranura*.

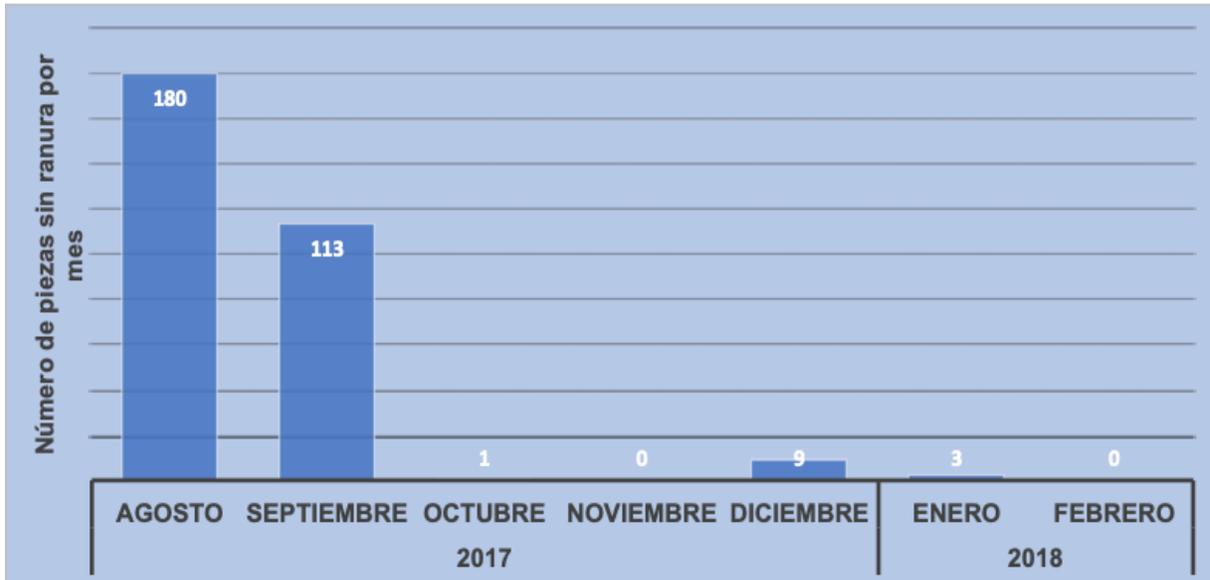


Figura 4.22 Comportamiento de piezas sin ranura. Fuente: Elaboración propia (2018)

El nuevo flujo del proceso ayudó a disminuir la omisión de las operaciones tanto las ranura como de los barrenos; la **Figura 4.23** muestra el impacto del cambio en las piezas sin barreno.

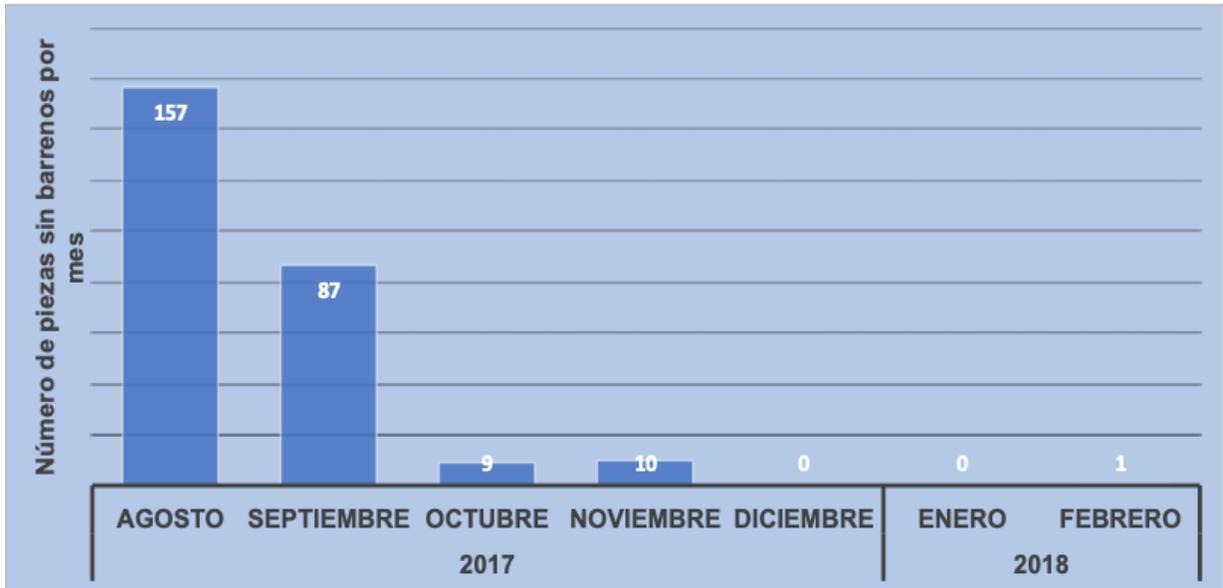


Figura 4.23 Comportamiento de piezas sin barreno. Fuente: Elaboración propia (2018).

Se puede observar que el envío de piezas sin barrenos disminuyó considerablemente, de 87 en septiembre a 9 en octubre, es decir, disminuyó en más del 80%.

El cambio de lugar de la máquina ranuradora se llevó a cabo el día 14 de noviembre del 2017, ayudando así a una detección oportuna de *poro*. Adicionalmente, la nueva configuración permite tener una mejor comunicación con el supervisor de fundición

para corregir de forma inmediata los parámetros en la máquina. Los resultados se muestran en la **Figura 4.24**.

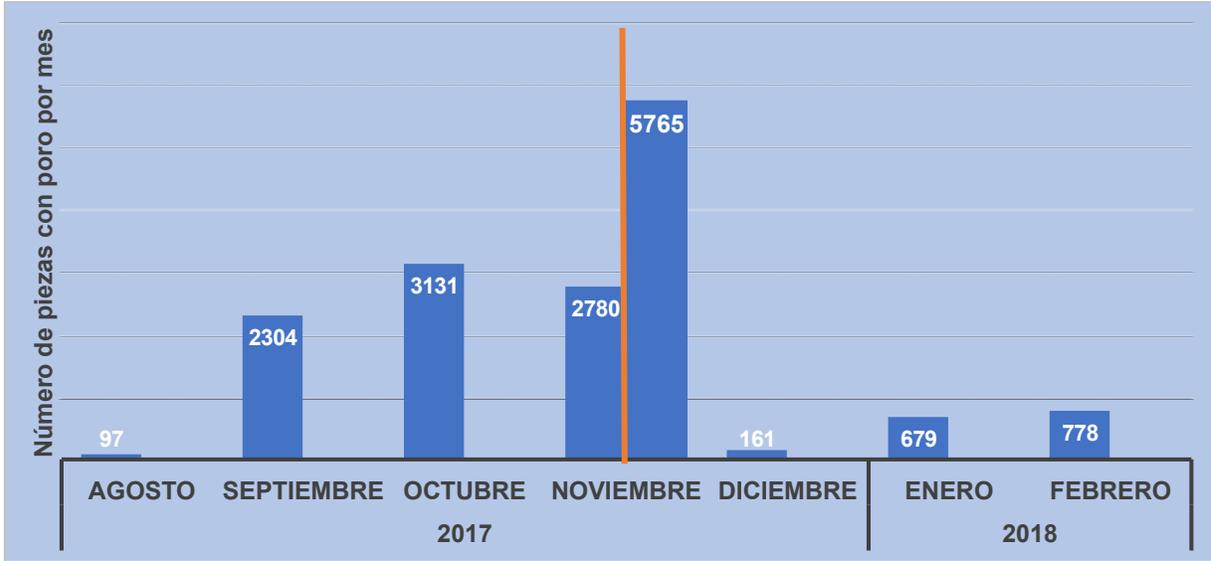


Figura 4.24 Comportamiento de las piezas con poro. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 4.24** se muestran dos barras para el mes de noviembre, la primera indica las piezas con *poro* antes del movimiento de la máquina ranuradora y la segunda posterior al cambio de esta. La segunda barra tiene una cantidad de *poro* elevado ya que hubo material estancado; sin embargo, se observa en la gráfica que después de que ese material fue procesado, el *poro* disminuye. En diciembre se observa una cantidad muy pequeña, aunque este defecto vuelve a aumentar en enero y febrero (aunque hasta apenas un 25% de los niveles de antes del cambio), por causas hasta ahora desconocidas.

En **Tabla 4.3**, se observa el orden de las operaciones antes y después de la mejora; se observa que se reduce una actividad que no le está agregando valor al producto.

Tabla 4.3 Tabla comparativa de las operaciones del proceso del Base Bracket Q5.

Proceso anterior	Proceso actual
1. Fundición	1. Fundición
2. Despojo de colada	2. Despojo de colada
3. Lijas	3. Ranura
4. Machuelo	4. Lijas
5. Maquinado	5. Machuelo
6. Ranurado	6. Maquinado
7. Barrenado	7. Barrenado
8. Liberación final	

Con el nuevo flujo de material se elimina la revisión adicional por el área de calidad, supervisando solamente el ranurado, machueleado, maquinado y barrenado. De esta forma las piezas son entregadas más rápido en el almacén, para que se manden a pintura, lo que permite optimizar el personal y reducir costos.

4.2 Etapa 2 de la metodología

Antes de iniciar la segunda etapa, se realizó un cambio en el flujo de la pieza Base Bracket Q5; el objetivo fue reducir el transporte de material hacia el proveedor de pintura.

El proceso de pintura se lleva a cabo después del maquinado y antes de mandar la pieza al departamento de calidad. Para esta operación, las piezas son enviadas a Tizayuca, Hidalgo, y posteriormente se envían a PRODDI para la inspección final.

Se intercambiaron las operaciones de inspección de calidad y pintura, pasando a ser el proceso de pintura el último antes de la entrega al cliente, para evitar el regreso innecesario de las piezas a la planta. El departamento de calidad realiza la inspección de todos los parámetros críticos de la pieza antes de enviarla a pintura. Al terminar el proceso de pintura se empaca la pieza para su entrega al cliente final.

4.2.1 Definir

Después de la primera etapa de mejora, se observó un nuevo problema en la línea de producción. El cliente final está inconforme porque llegó a su planta una pieza sin la operación de machueleado. Este es un parámetro crítico de calidad, ya que si la pieza no cuenta con esta operación hace imposible el ensamble del espejo con la puerta del automóvil. Es preocupante que el visto bueno de calidad en maquinado sin haberse detectado, y que, posteriormente, al ser entregado al departamento de calidad donde se revisen las especificaciones críticas de la pieza (el machueleado, el ranurado y el barrenado), sin que este departamento haya detectado la pieza defectuosa.

4.2.2 Medir

Para analizar la causa y la gravedad del defecto anterior, se obtuvieron los datos históricos para el período comprendido entre agosto de 2017 y mayo de 2018, fecha en que se recibe el reclamo del cliente, para observar si este defecto ha sido recurrente durante este tiempo. No se encontraron piezas con este defecto en el área de maquinado. Sin embargo, el departamento de calidad sí ha detectado piezas sin machueleado, en cantidades que se muestran en la **Figura 4.25**.

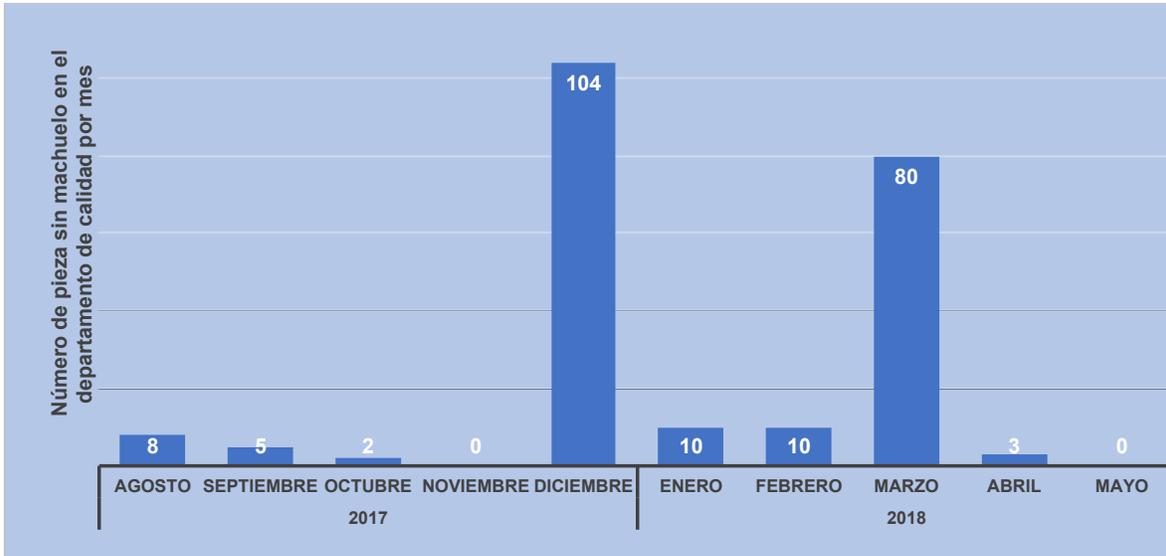


Figura 4.25 Piezas sin machuelo detectadas por el departamento de calidad. Fuente: Elaboración propia (2018).

La **Figura 4.25** muestra que, en la mayoría de los meses, hay pocas observaciones de piezas sin machueado (0 a 10 piezas). Sin embargo, en diciembre y marzo se observaron respectivamente, 104 y 80 piezas con este defecto. El incremento en diciembre fue debido a una mala identificación de las piezas en proceso y un exceso de movimientos realizados por el inventario y en marzo se debió a una confusión por una mala identificación de material del área de maquinado, por lo que se mandó una caja completa sin el proceso de machueado.

Además del defecto de *sin machueado*, se decidió revisar en los datos históricos (agosto de 2017 a mayo de 2018) también la frecuencia de detección de piezas *sin barrenos* y *sin ranuras* por el departamento de calidad. En las **Figuras 4.26 y 4.27** se muestra el comportamiento de los dos defectos anteriores.

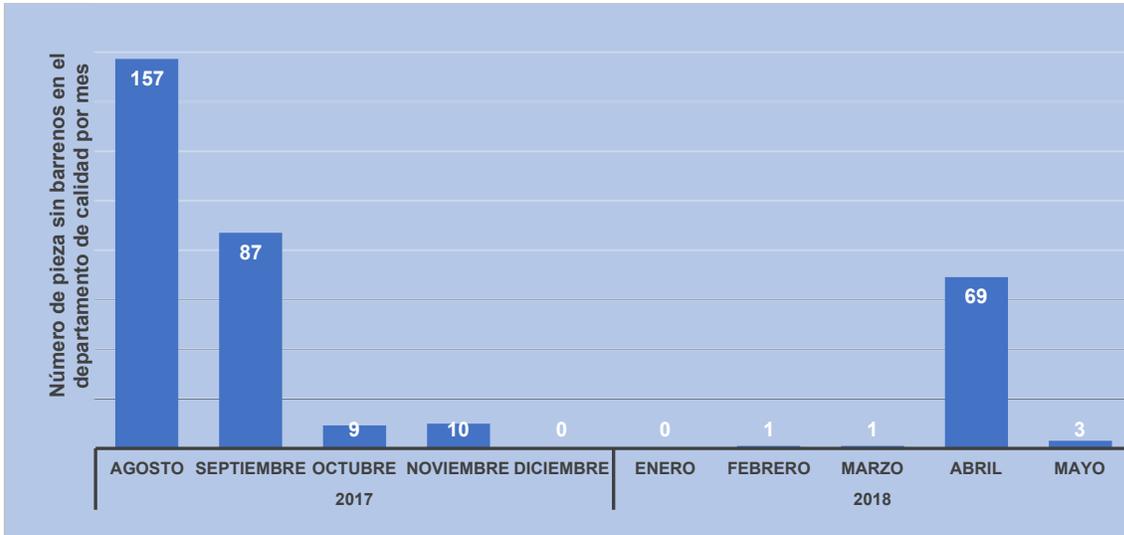


Figura 4.26 Piezas sin barrenos detectadas en departamento de calidad. Fuente: Elaboración propia (2018).

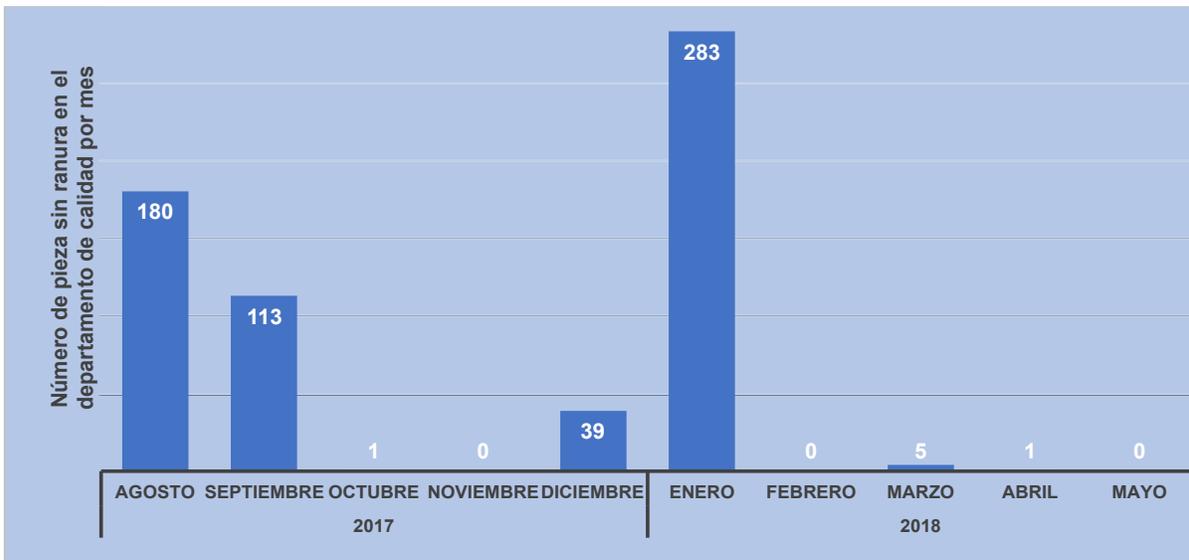


Figura 4.27 Piezas sin ranura detectadas en departamento de calidad. Fuente: Elaboración propia (2018).

En las **Figuras 4.26 y 4.27** se confirma que además de las piezas sin machueado, el departamento de calidad también detecta piezas sin barrenos y/o sin ranura. Cualquiera de los tres defectos anteriores son críticos y no es admisible su ocurrencia. En la siguiente fase se realiza un análisis de las posibles causas raíz que generan este problema.

4.2.3 Análisis

Con los datos que se obtuvieron en la etapa anterior, se encontró que las mejoras aplicadas en el orden del proceso, a partir del mes de octubre, ayudaron a disminuir

no sólo los defectos de *poro* y *golpe*, sino que también se tuvo una disminución de las piezas rechazadas por otros defectos, tanto en maquinado como en departamento de calidad; sin embargo, se encontró otro defecto detectado por el cliente que reportó la falta de una operación de maquinado de la pieza.

En la **Figura 4.26** se hace un análisis del mes de abril del 2018 para encontrar por qué existió un aumento de pieza *sin barrenos* y se detectó que el control que se implementó con las tarjetas viajeras para identificar las operaciones por las cuales ya ha pasado el material no se está siguiendo al 100%. El responsable del proceso de barrenado comenta que confundió una caja y la mandó sin esta operación.

Para las piezas *sin ranura* se analiza la **Figura 4.27**. Se observa que en enero se tuvo un aumento considerable; como se dijo anteriormente, esto es porque en los meses de diciembre y enero hubo exceso de movimiento de material por el inventario que se realizó, causando que varios de los defectos aumentaran. En este caso, el exceso de movimiento y la mala identificación del material provocó enviar al proveedor de pintura piezas sin esta operación y al regresar de este proceso y pasar al departamento de calidad para la liberación de sus operaciones críticas, fueron rechazadas. Cabe mencionar que estas piezas tuvieron que ser retrabajadas, aunque ya con un reproceso que genera costos extras.

Para la queja que presenta el cliente de la falta de machueleado en una pieza se hace nuevamente un análisis del *layout* de la planta (**Figura 4.28**) y sus movimientos.

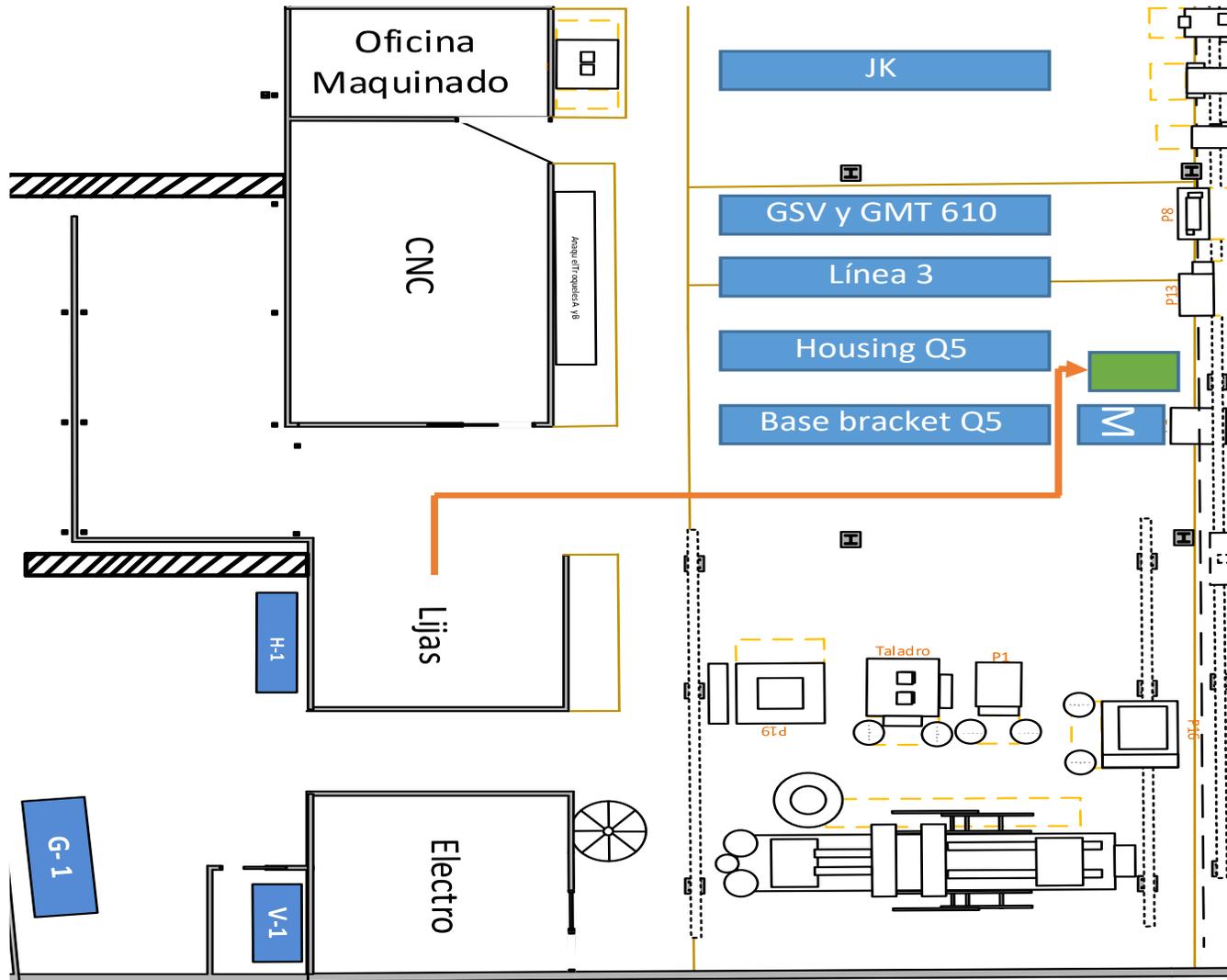


Figura 4.28 Layout de la planta, en verde se muestra el área en el que es almacenado el producto previo al proceso de machuelo. Fuente: Elaboración propia (2018).

Se identifica que después del proceso de lijado, las cajas con las piezas que pasan al proceso de machuelo son almacenadas en un costado de la máquina de machueleado. Después del departamento de lijas, el material se almacena en el área señalada de color verde para ser procesada posteriormente. Se distingue que a pesar del cambio de flujo y los resultados que se dieron por este cambio, aún se tiene un problema de contaminación de material, ya que los operadores por distracción pueden tomar una pieza sin machuelo y pasarla a la mesa de trabajo sin ser detectada por ninguno de ellos, incluso por el inspector de calidad al final del proceso.

Por otra parte, se identifica que el barrenado como última parte del proceso, genera defectos ocasionados por las variaciones de la barrenadora, provocando el rechazo de algunas piezas y como consecuencia costos extras, si bien este proceso es perfectible, es importante comprender que la funcionalidad de la barrenadora siempre arrojará un porcentaje de piezas rechazadas, por lo que la manera de disminuir esta variación se encuentra no en mejorar la funcionalidad de esta, sino en el flujo que este proceso ocupa en la línea de producción.

4.2.4 Implementar

Para la solución de los problemas anteriores, se propone trabajar en una línea continua, como lo señala *lean manufacturing*. Se propone la implementación de un proceso lineal para evitar stocks entre departamentos. Ahora se busca introducir un flujo continuo desde la primera hasta la última operación.

Se recomienda redistribuir las estaciones de trabajo y los procesos para que el flujo de producción sea ininterrumpido entre cada operación, reduciendo el tiempo de respuesta y maximizando las habilidades del personal. El proceso consiste en agrupar las máquinas y operaciones de forma secuencial, en las que se puede trabajar la pieza de principio a fin sin recurrir a movimientos innecesarios e ineficientes, eliminando inventarios en proceso y haciendo fluir la producción continuamente.

En la planta de PRODDI no se cuenta con el espacio suficiente para realizar los movimientos necesarios de las máquinas; sin embargo, se cuenta con un espacio libre en la bodega ubicada fuera de la planta. En este espacio disponible se puede realizar la adecuación de las máquinas, maquinado y el departamento de calidad. Se incluye el departamento de calidad como un flujo continuo junto con maquinado para que se tenga una recepción directa del material, y así disminuir el transporte de material. En la línea se coloca el proceso de barrenado, machueleado, línea de maquinado y su liberación de calidad para ser enviada al cliente.

No se recomienda mover la máquina de ranurado, ya que al ponerla en el área de fundición ha mejorado la comunicación entre los operadores de maquinado y los de fundición, logrando reducir y detectar de manera oportuna el defecto de *poro*. La máquina de lijado no es posible moverla, ya que esta no se ocupa únicamente para el Base Bracket Q5, sino que se utiliza en varios productos que se fabrican en la empresa.

En la **Figura 4.29** se muestra el nuevo arreglo del de la línea de maquinado y cómo se combina con el departamento de calidad, haciendo más eficiente la comunicación entre los mismos.

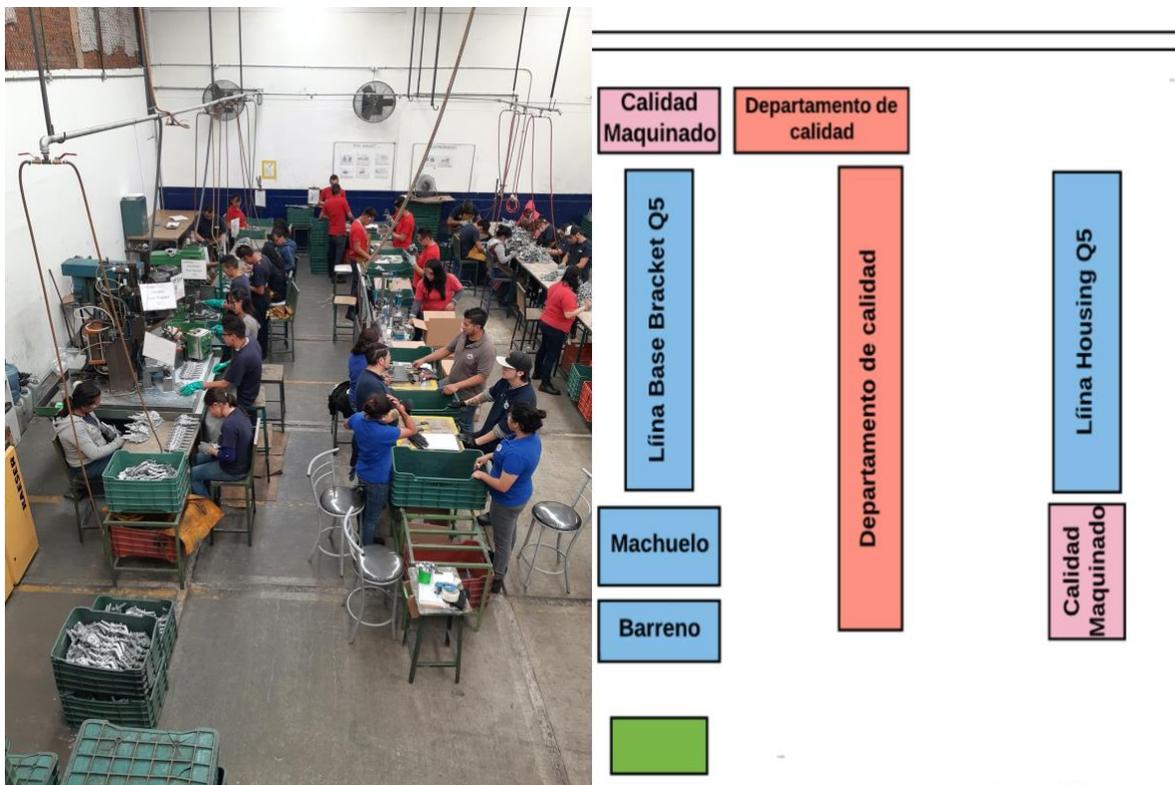


Figura 4.29 Flujo continuo en la línea de producción Base Bracket Q5. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 4.29**, de lado izquierdo se observa la línea de producción de maquinado ya en conjunto con las máquinas barrenadora y machueleadora. El diseño de la línea se hace de acuerdo con los tiempos de las operaciones, sin afectar el desempeño de la producción.

Se decidió colocar primero la máquina barrenadora, que tiene un mayor rechazo que la máquina de machueleado. Con este cambio se aumenta la productividad de la línea, porque las piezas que no pasan satisfactoriamente el proceso de barrenado

se detectan en este momento y ya no pasan innecesariamente por las demás operaciones.

El maquinado es la última operación y los únicos defectos que pueden ser generados en ella es el mal limado de la pieza, correspondiendo este a un número bajo de rechazos.

De lado derecho, con playera roja, se observan los colaboradores del departamento de calidad, que se ubica justo al lado del área de maquinado, teniendo una recepción más rápida de las piezas y una mejor comunicación entre la líder de maquinado con la líder de departamento de calidad para solucionar los problemas que se presenten. Con el flujo continuo se logra aumentar la productividad de las piezas e inclusive se elimina el tiempo extra entre semana y fines de semana.

4.2.5 Control

Se realiza una actualización del plan de control de la pieza en donde se documenta el nuevo flujo del proceso desde su entrada hasta su empaque final para entregarse al cliente. Se realizan nuevos instructivos de trabajo, para colocarlos en la operación correspondiente y se asigna un área de entrada de material a trabajar en línea. Aunado a esto, se limita a entregar a la líder de maquinado únicamente el número de cajas que se debe trabajar por día, esto para evitar nuevamente una contaminación del material.

Se da una capacitación a todo el personal que participa en este producto para que conozcan el nuevo proceso, se les explica la importancia y las ventajas de trabajar con un flujo continuo y se monitorea que los operadores no rompan el flujo, ya que puede causar confusión y nuevamente mezclarse el material.

4.2.6 Resultados

Para interpretar los resultados, se dividen las mejoras implementadas de este trabajo por etapas. Para los defectos analizados en la primera etapa y que se les dará seguimiento en esta segunda etapa se pondrá con azul claro las barras de los meses previamente analizados y únicamente se interpretarán los nuevos resultados (los de la segunda etapa de mejora).

La situación inicial del proceso corresponde a los meses de septiembre, octubre y hasta el día 14 de noviembre del 2017, cuando se implementó la primera mejora. La primera etapa de mejora inicia el 15 de noviembre del 2017 y termina el 25 de junio del 2018. La última mejora se implementó el día 25 de junio del 2018. En las **Figuras 4.31, 4.32, 4.33 y 4.34** se muestran los resultados que las mejoras

obtuvieron con respecto a la producción en línea, para los defectos de *golpe*, *sin ranurado*, *sin machueleado* y *sin barrenado*.

En la **Figura 4.30** se observa en color azul el promedio de producción en un principio, con naranja se marcan los resultados después la primera mejora implementada, que fue el cambio de mesa y movimiento de maquina ranuradora, y con verde están marcados los resultados obtenidos después el último cambio del proceso, en donde se mejoró la continuidad de la línea.

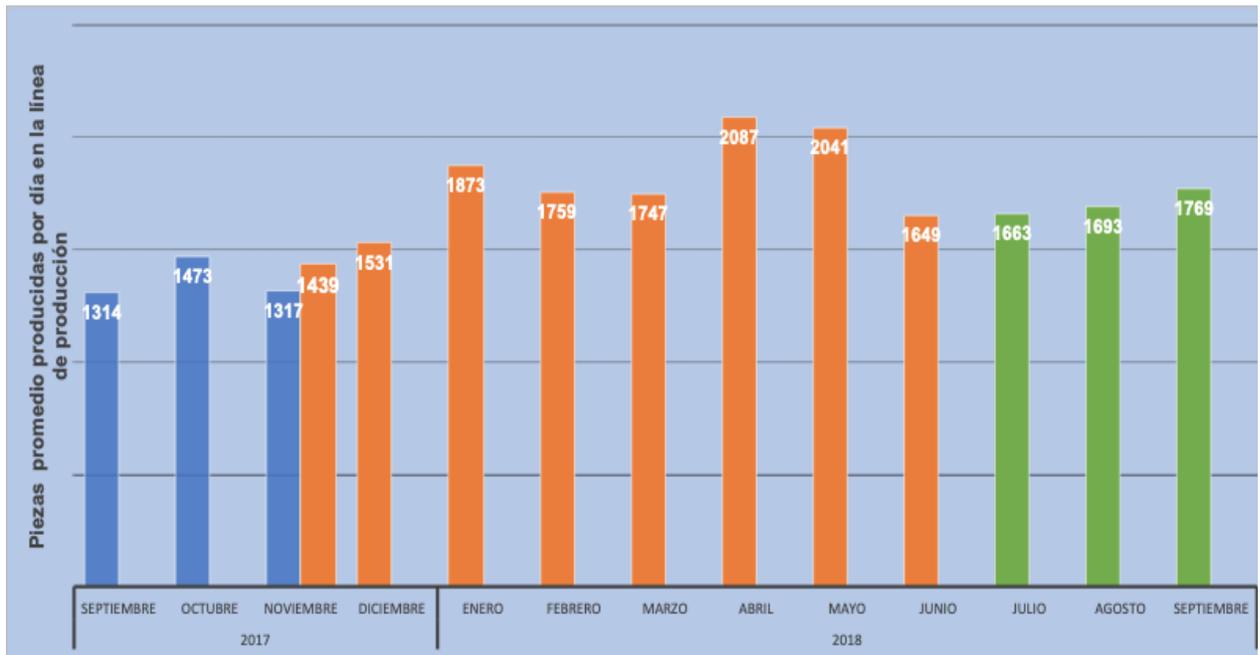


Figura 4.30 Comportamiento de la producción en línea durante el proceso de mejora. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 4.30** se observa que las mejoras aplicadas a lo largo del tiempo ayudaron a aumentar el promedio de la productividad en la línea. Sin embargo, el análisis del porqué disminuyó la cantidad de piezas producidas a partir de junio del 2018 se debe que la línea de producción del Base Bracket Q5 tuvo paros no programados por diversos factores, entre ellos la reparación del molde de inyección, además de que algunos días se destinó a la línea para apoyar con otras piezas por la urgencia de producción.

Cabe mencionar que, para fines de esta gráfica, se omitieron los datos de producción de los días sábados y domingos. Estos días no son laborables por contrato, por lo que se pagan como horas extras. Con las mejoras se buscó cubrir las necesidades de producción sin recurrir al tiempo extra, lo cual si fue logrado. Se concluye que haciendo un mejor flujo y manejo de material se pueden producir más piezas con menos defectos en menor tiempo.

En la **Figura 4.31** se muestra cómo ha evolucionado el comportamiento de las piezas con *golpe* a través de las diferentes fases de mejora aplicadas a los procesos y el flujo del Base Bracket Q5.

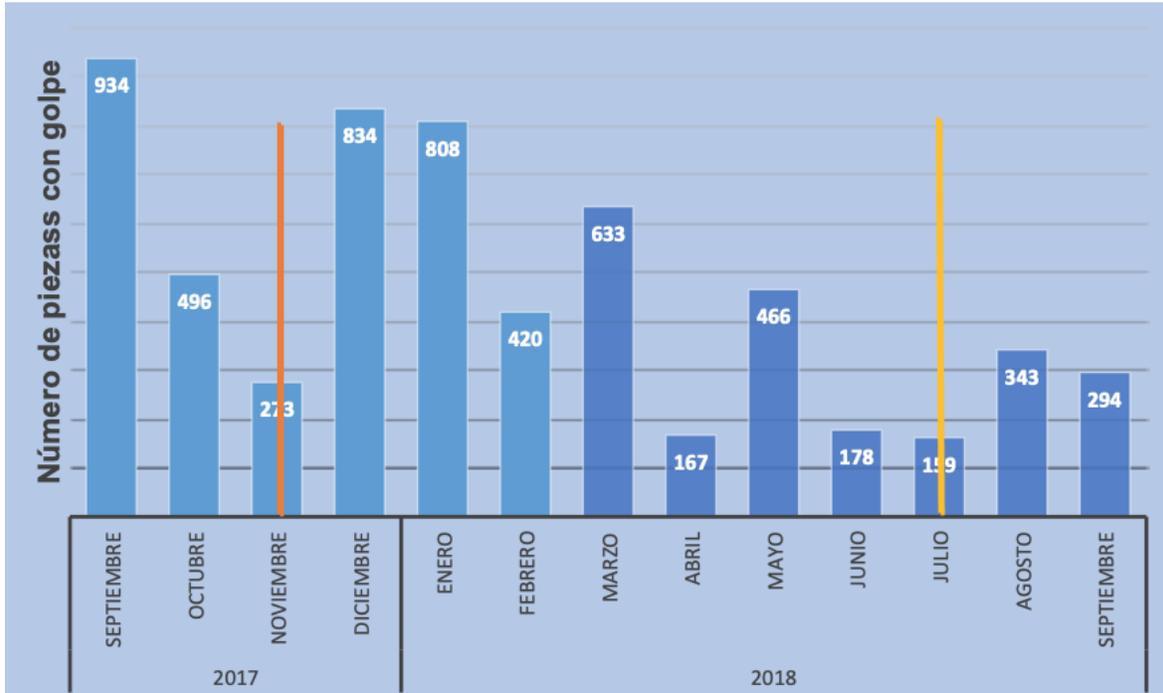


Figura 4.31 Piezas con golpe en el área de maquinado. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 4.31** se aprecia que durante el primer período de mejora (marcado con la línea anaranjada) el defecto de *golpe* disminuyó de forma significativa. Sin embargo, a partir de la última modificación que se hizo al proceso (marcado con la línea amarilla) se tiene un aumento, debido a que el movimiento del material para llevarlo a maquinado es largo, y en el traslado las piezas se golpean.

En las **Figuras 4.32, 4.33 y 4.34** se muestra la evolución del proceso en cuanto a la omisión de alguna operación. De nuevo, las líneas anaranjada y amarilla indican respectivamente la primera y segunda mejora. Como se mencionó anteriormente, son operaciones críticas y sin alguna de ellas es imposible el ensamble de la pieza, provocando una inconformidad en el cliente.

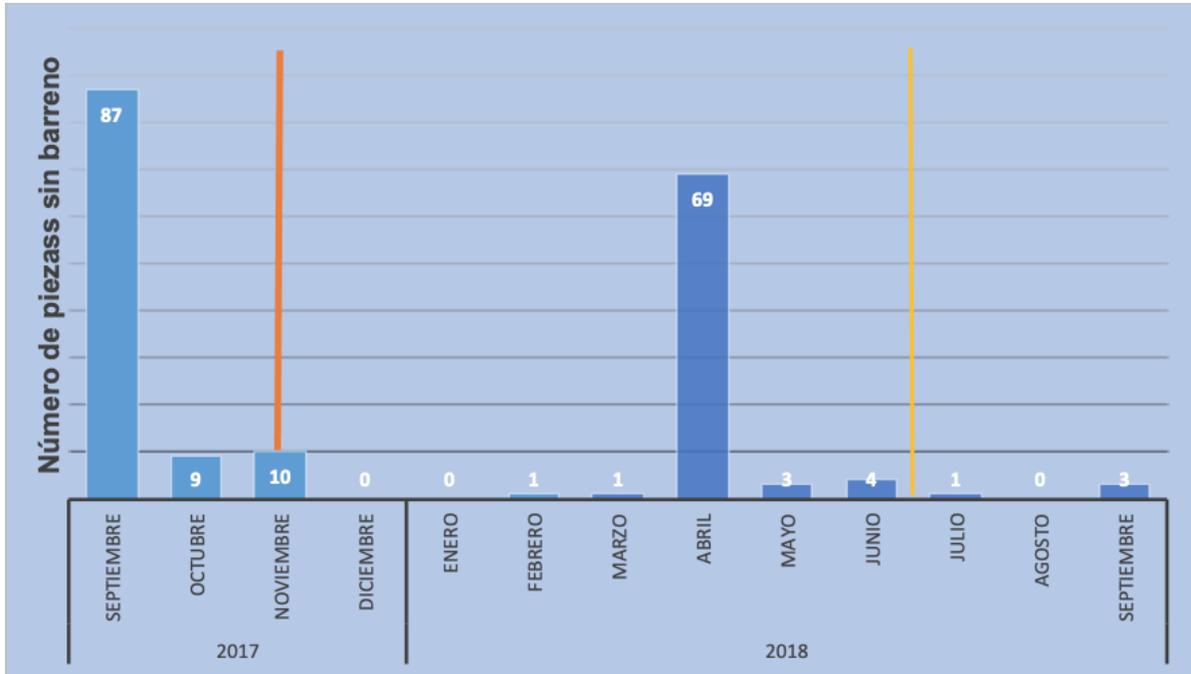


Figura 4.32 Comportamiento de piezas con falta de barreno. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 4.32** se observa que las mejoras lograron disminuir la cantidad de piezas sin barreno. En la etapa anterior se comentó porqué en abril del 2018 incrementó el número de piezas sin barreno. Sin embargo, es necesario seguir trabajando en mejorar y controlar este proceso ya que continúan apareciendo piezas sin esta operación y una pieza sin barreno es inaceptable.

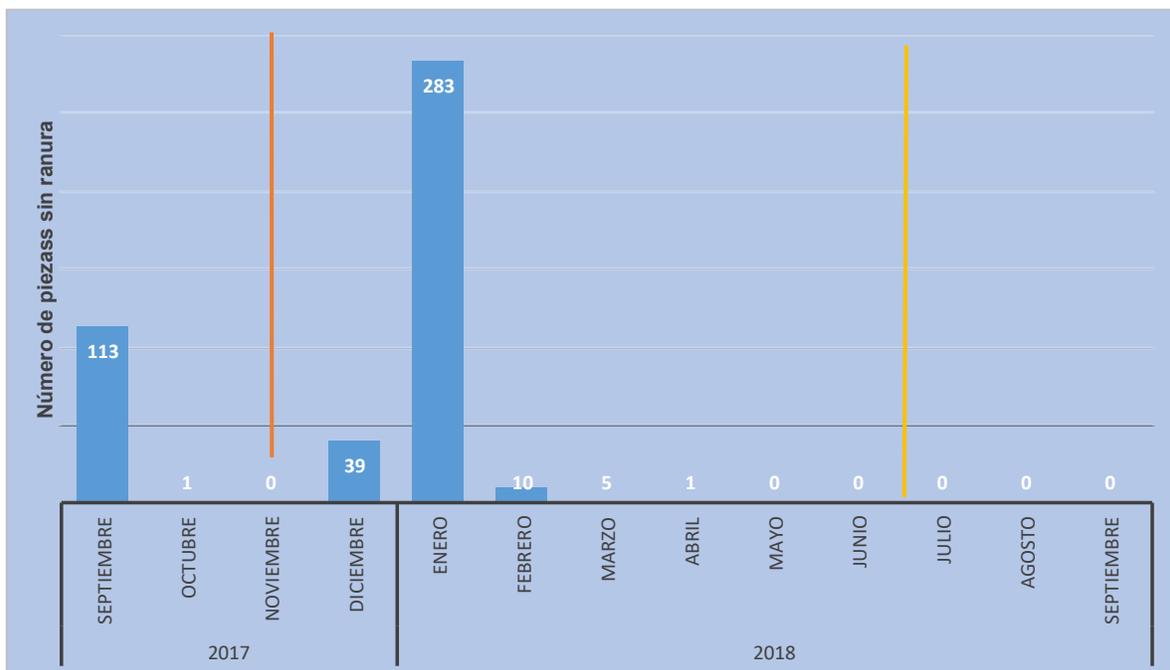


Figura 4.33 Comportamiento de piezas con falta de ranura. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 4.33** se muestra cómo impactaron las mejoras en las piezas *sin ranura* y se puede concluir que, para este defecto, las soluciones implementadas son satisfactorias. Se analizó porqué fue tan elevada la cantidad de rechazos por falta de ranura en el mes de enero y se encontró que, por falta de identificación, se enviaron cajas de piezas sin el proceso de ranurado al proceso de pintura. La causa de este problema es la falta del seguimiento de los controles implementados, por lo que se mezcla material procesado con material sin esta operación. Esto se detectó en el departamento de calidad, al final del proceso. A pesar de esto se observa que se controló y fue eliminado por completo.

No obstante, es necesario señalar que, como parte del seguimiento y control de las piezas, es fundamental implementar la capacitación y generar recursos que delimiten las responsabilidades tanto de la líder de la línea, los responsables de los procesos, así como de los operadores. El monitoreo de los controles implementados, solo podrá ser operativo a partir de la definición clara de responsabilidades y obligaciones de cada una de las personas que forman parte de esta línea de producción.

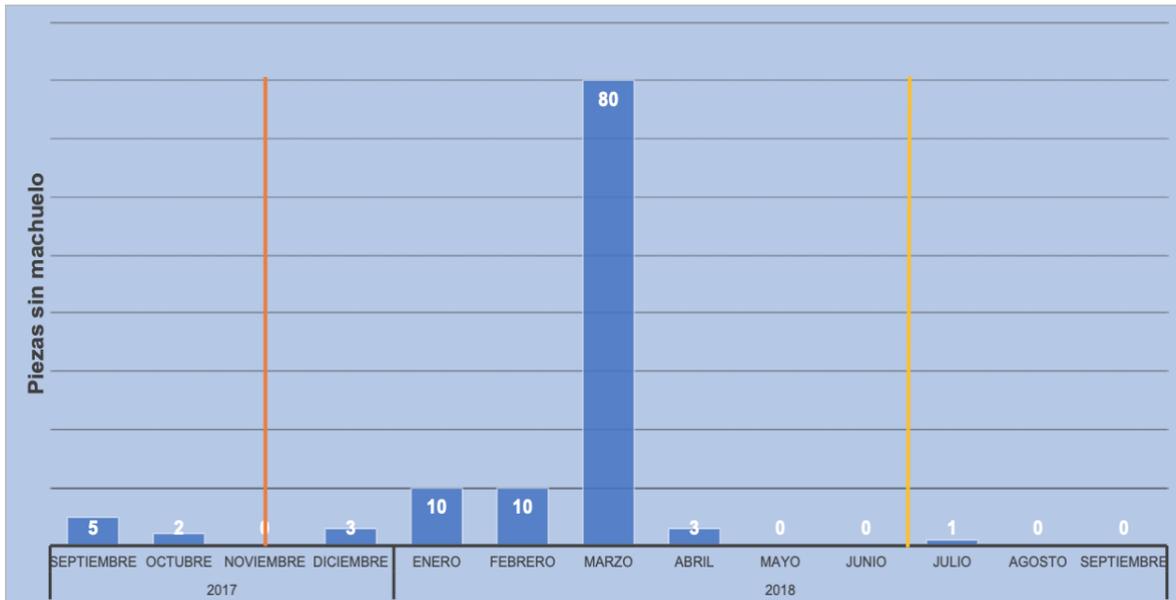


Figura 4.34 Comportamiento de piezas con falta de machuelo. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 4.34** se muestra que solo a partir de la segunda etapa se tiene un impacto positivo en las piezas sin machueado. En esta última etapa hay una disminución e incluso eliminación completa de esta falla; a pesar de ello es necesario seguir controlando el proceso para no se vuelvan a presentar los defectos.

CAPITULO 5 Evaluación de las mejoras

En la **Figura 5.1** se aprecia una pirámide de Pareto, en ella se observa de forma gráfica los beneficios obtenidos después de haber realizado las mejoras en el proceso. Se muestran los porcentajes del antes y después de las mejoras aplicadas.

El porcentaje se calculó dividiendo la cantidad de defectos entre la producción del mes. La comparación de la figura corresponde al mes de septiembre del 2017 versus septiembre del 2018, teniendo un 22.93% de piezas defectuosas y logrando reducirlo hasta un 2.51% de piezas rechazadas. Es importante mencionar que, actualmente, las piezas son clasificadas por un solo tipo de defecto, es decir una pieza puede tener *poro* y *clip chueco*; sin embargo, será clasificada únicamente por uno de ellos.

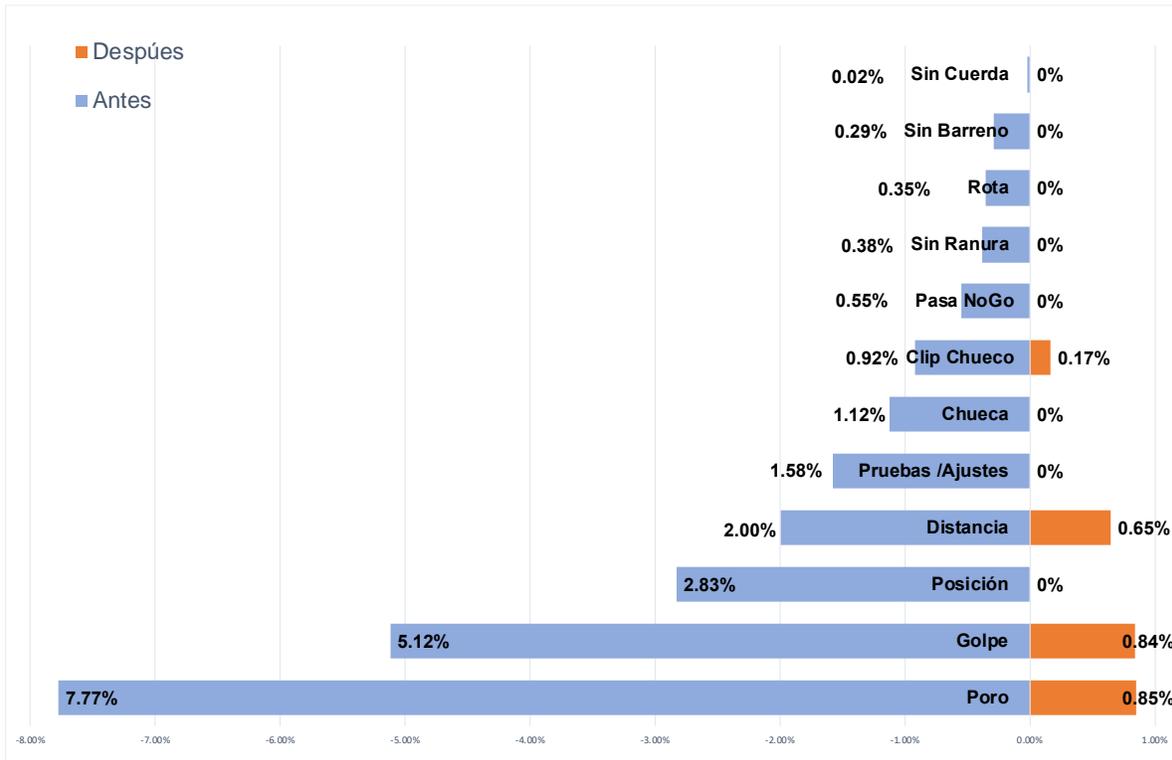


Figura 5.1 Pirámide de Pareto comparando porcentaje de defectos antes y después de las mejoras. Fuente: Elaboración propia (2019).

En la **Figura 4.36** se observa que una disminución considerable de los defectos de *poro* y *golpe*, que fueron los principales defectos sobre los que se actuó. También se aprecia que varios defectos fueron eliminados por completo. Se observa que el defecto de *distancia* y *posición* disminuyeron de forma considerable; esto fue debido a que hubo un ajuste de máquina programado, pero este ajuste fue independiente a la implementación de la metodología de este trabajo.

Como parte de la evaluación de las mejoras, la **Figura 5.2** muestra cómo el porcentaje mensual de piezas rechazadas disminuyó a partir de las acciones aplicadas al proyecto Base Bracket Q5. También se indica la producción lograda en cada mes.

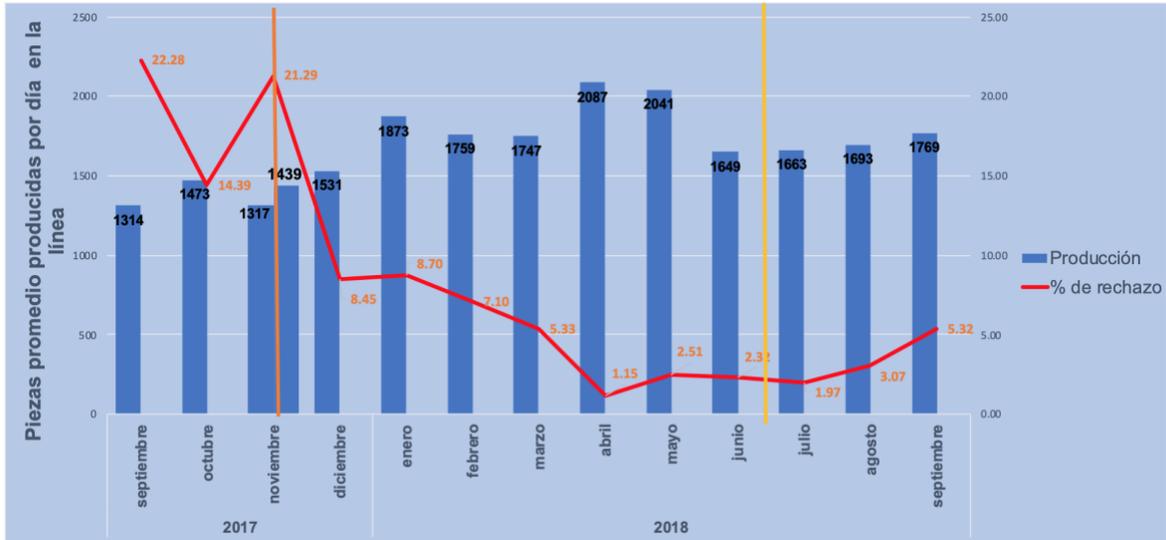


Figura 5.2 Comportamiento del porcentaje de piezas rechazadas mensualmente. Fuente: Elaboración propia (2018).

En la **Figura 5.2** se marca con una línea de color naranja el momento de aplicación de las primeras mejoras al proceso y con línea amarilla la segunda mejora aplicada. Se observa en la gráfica cómo el porcentaje de rechazo de piezas disminuyó a partir de que se aplicaron las mejoras. Sin embargo, en los últimos dos meses hay un pequeño aumento. Este aumento fue debido al *golpe*, como fue previamente analizado.

5.1 Pruebas de hipótesis

5.1.1 Primera etapa

Para analizar estadísticamente si las mejoras aplicadas funcionan para disminuir el defecto, se realizó una prueba de hipótesis de una cola para dos proporciones, correspondiente a dos atributos de calidad, pasa o no pasa.

Las hipótesis por probar son las siguientes:

H_0 : No existe diferencia en el número de piezas con *golpe* con o sin el cambio de manejo de material, nuevo flujo y cambio de mesa de trabajo.

H₁: Sí existe diferencia en la reducción de *golpe* con el nuevo manejo de material y el cambio de la mesa de trabajo.

Esto se expresa de forma matemática de la siguiente manera:

H₀: p₁ = p₂ (La proporción de *golpe* es la misma una vez aplicada la mejora)

H₁: p₁ < p₂ (Las acciones aplicadas funcionan)

Si la hipótesis nula es rechazada se concluye que, si se tiene un mejor manejo de material, un mejor flujo y una mesa de trabajo nueva, se tiene un resultado positivo al problema de *golpe*. Se calculan las proporciones con ayuda de la ecuación (1).

$$p_1 = \frac{880}{39054} = .02253 \quad (\text{Después de la mejora}) \quad (27)$$

$$p_2 = \frac{1517}{29640} = .05118 \quad (\text{Antes de la mejora}) \quad (28)$$

La proporción global de *golpe* se estima a través de la ecuación (2):

$$\hat{p} = \frac{(39054)(.02253) + (29640)(.05118)}{39054 + 29650} = .03489 \quad (29)$$

Utilizando la ecuación 3 y con el valor de la proporción global se puede obtener la desviación estándar de la diferencia de las proporciones de las piezas con *golpe*.

$$\sigma_{p_1 p_2} = \sqrt{0.03489(1 - 0.03489) \left(\frac{1}{39054} + \frac{1}{29640} \right)} = 0.001594 \quad (30)$$

La diferencia de las porciones de las piezas con *golpe* antes y después de la mejora se estandariza con la ecuación 4. La prueba se realiza con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = .05$).

$$z_{prueba} = \frac{.02253 - .05118}{.001594} = -20.26486 \quad (31)$$

$$z_c = -1.65$$

El valor obtenido de z de prueba cae fuera de la región de aceptación, por lo que existe evidencia estadística suficiente para rechazar H_0 y se concluye que las mejoras implementadas en el manejo de material, cambio de flujo y mesa nueva de trabajo el número de piezas golpeadas.

La **Tabla 5.1** muestra un resumen de los resultados de las pruebas de hipótesis para los defectos, correspondientes a un nivel de significancia del 5% y un valor de $z_c = -1.65$.

Tabla 5.1 Pruebas de hipótesis para los defectos del Base Bracket Q5.

Defecto	p_2	p_1	p	Z_0	Se acepta	Se rechaza
Golpe	0.05118	0.02253	0.03489	-20.26486	No	Si
Poros	0.07773	0.01992	0.04487	-36.25256	No	Si
Clip chueco	0.02395	0.00558	0.01351	-20.65904	No	Si
Sin barrenos	0.00530	0.00003	0.00230	-14.28434	No	Si
Sin ranura	0.00607	0.00000	0.00262	-15.42054	No	Si

Cabe mencionar que la p_2 calculada es el porcentaje de la pirámide Pareto (**Figura 5.1**). De la **Tabla 4.4** se concluye que existe suficiente evidencia estadística en cada una de las pruebas para decir que las mejoras efectuadas en el proceso tienen un impacto positivo para disminuir la cantidad de defectos. Por lo tanto, por el nuevo tipo de mesa y el flujo de material ya no influyen en los defectos.

En la **Figura 5.3** se observa el comportamiento de la producción con los cambios efectuados.

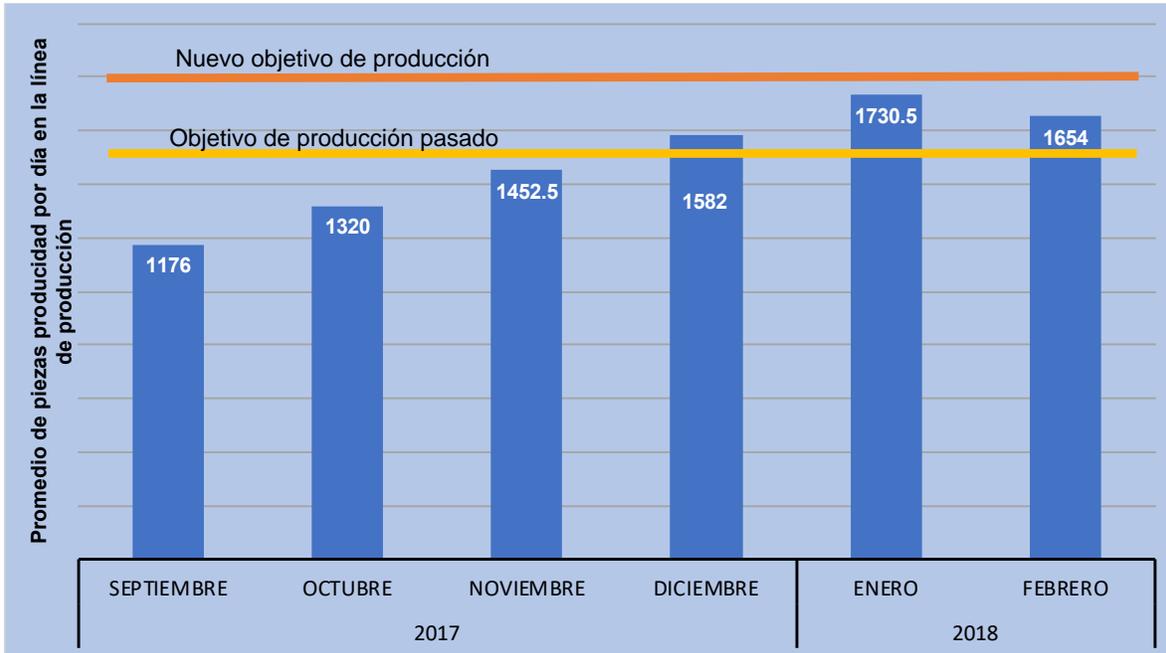


Figura 5.3 Resultados de la producción de maquinado con las mejoras implementadas. Fuente: Elaboración propia (2019).

En la **Figura 5.3** se observa que la producción aumentó con ayuda de las mejoras implementadas. El cambio de la mesa de trabajo ayudó a disminuir los tiempos en maquinado, logrando aumentar la producción de 170 a 200 piezas por hora. Con el incremento en la productividad, se aumentó el objetivo diario de 1,500 (línea amarilla) a 1,800 (línea anaranjada) piezas diarias, es decir 300 piezas más con respecto a lo que se producía anteriormente. Cabe mencionar que el objetivo anterior de 1,500 no se cumplía; con esta mejora de la productividad se aumentó el objetivo diario, pero no siempre se alcanzaba. Los meses de noviembre y diciembre fueron de adaptación a los cambios por parte de los operadores.

Los resultados de la primera etapa muestran una reducción considerable en los defectos estudiados y atendidos. Dentro de la metodología de mejora continua es necesario seguir aplicando los pasos anteriores para encontrar una solución a los nuevos problemas que se presentan en la organización. A continuación, se describe la nueva complicación que surgió en el proceso.

5.1.2 Segunda etapa

Se realizan pruebas de igualdad de proporciones para comprobar de forma estadística si las mejoras implementadas ayudaron a disminuir los defectos. Para las pruebas de proporciones de esta etapa se ocupa el mismo método mostrado en la sección 4.3.1. A continuación, se plantean las hipótesis y se considera un nivel de significancia del 5%.

Las hipótesis planteadas son:

H_0 : No existe diferencia en el número de piezas defectuosas sin y con las mejoras aplicadas al proceso.

H_1 : Existe una reducción de defectos con las mejoras aplicadas en el proceso.

En la **Tabla 5.2** se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los defectos y las conclusiones correspondientes, recordando que para un nivel de significancia del 5% se tiene una $z_c = -1.65$, prueba de una cola.

Tabla 5.2 Pruebas de hipótesis para defectos de Base Bracket Q5.

Defecto	p1	p2	p	S	Zo	Se acepta	Se rechaza
Golpe	0.00844	0.010754	0.00966	0.000721	-3.20970		X
Poros	0.01938	0.018871	0.01911	0.001009	0.50234	X	
Chueca	0.0064881	0.005582	0.006009	0.00057	1.590797	X	
Sin barreno	0.00086	0.00003	0.00005	0.000054	1.116108	X	
Sin machuelo	0	0.000256	0.000135	0.000086	-2.986703		X
Sin ranura	0	0.000128	0.00007	0.000061	-2.111847		X

En la **Tabla 5.2** se observa que, tras las pruebas de proporción aplicadas, para los defectos de *poro*, *chueca* y *sin barreno*, se aceptan la hipótesis nula, encontrando que no existe una diferencia contundente entre el número de estos defectos generados antes y después de realizar la segunda etapa. Asimismo, se observa que los defectos de *golpe*, *sin machueado* y *sin ranurado* rechazan la hipótesis nula, lo que indica que el tener el flujo continuo en la línea ayuda en la disminución de estos defectos.

5.1.3 Análisis de varianza de las medias en diferentes etapas

Se realiza un análisis de varianza (ANOVA), para comprobar de forma estadística si las mejoras aplicadas al proceso ocasionaron un cambio en la producción media. Para poder realizarlo es necesario que los datos cumplan el criterio de normalidad y homocedasticidad.

5.1.3.1 Bondad de ajuste para normalidad

Con los datos históricos y de las mejoras implementadas se realiza una prueba de bondad de ajuste para normalidad con el método de la Shapiro-Wilks.

Las hipótesis por probar son:

H_0 : La producción tiene una distribución normal.

H_1 : La producción no tiene una distribución normal.

Se realizó el promedio de producción por semana de cada una de las etapas descritas en este trabajo. Se ejemplifica el procedimiento que se llevó a cabo con la situación en que se encontraba PRODDI, considerando un período de estudio del 1º de septiembre al 14 de noviembre del 2017.

Una vez que se obtiene el promedio (\bar{x}) de cada una de las semanas se ordenan de menor a mayor, posteriormente se obtiene la media de estos datos. Se calcula el término $(x_i - \bar{x})^2$ con la ecuación 7. Posteriormente se obtienen los coeficientes a_{in} para el contraste de Shapiro-Wilks, para esta etapa se tiene una n de 12. Finalmente, se ordenan en la siguiente columna nuevamente los datos en esta ocasión de mayor a menor. Una vez que se tiene ordenados los datos, se realiza la suma de las diferencias corregidas, únicamente hasta el número de coeficientes para el contraste de Shapiro-Wilks. En la **Tabla 5.3** se muestran los cálculos.

Tabla 5.3 Resumen de datos para el cálculo de prueba de bondad de ajuste Shapiro-Wilks.

i	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	a_{in}	x_i inversa	Dif ($x_i - x_i$ inversa)
1	835	465670	0.5475	2208	-1373
2	952	319903	0.3325	1968	-1016
3	1018	250000	0.2347	1872	-854
4	1291	51529	0.1586	1862	-572
5	1397	14593	0.0922	1684	-287
6	1507	108	0.0303	1618	-110
7	1618	10000		1507	
8	1684	27622		1397	
9	1862	118887		1291	
10	1872	125599		1018	
11	1968	202860		952	
12	2208	476652		835	

De la **Tabla 5.3** se puede observar que para $n = 12$ se tienen 6 coeficientes de corrección de Shapiro-Wilks (4ta. columna en la **Tabla 5.3**), por lo que únicamente se obtienen 6 diferencias corregidas.

Con los datos obtenidos en la **Tabla 5.3**, se realizan los cálculos para obtener el estadístico de Shapiro-Wilks. Se realiza la suma del producto de a_{in} y la dif ($x_i - x_i$ inversa). Una vez que se obtienen esos valores se utiliza la ecuación 6 para obtener el estadístico. En la **Tabla 5.4** se resumen los cálculos.

Tabla 5.4 Cálculo del estadístico de Shapiro-Wilks.

S^2	2063424
b	-1410
SW_c	0.964
SW_t	0.859

De acuerdo con el estadístico obtenido y comparando con el valor de tablas, se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula, por lo que los datos se ajustan a una distribución normal.

En la **Tabla 5.5** se presenta un resumen de los cálculos para la primera etapa. Estos se realizaron con el mismo procedimiento previamente explicado.

Tabla 5.5 Resumen de datos y cálculos de Shapiro-Wilk para la primera etapa.

i	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	a_{in}	x_i inversa	Dif ($x_i - x_i$ inversa)
1	1425	201284	0.4254	2670	-1245
2	1462	169453	0.2944	2289	-827
3	1516	128197	0.2487	2249	-733
4	1539	111988	0.2148	2144	-605
5	1565	95469	0.187	2075	-510
6	1565	95263	0.163	2032	-467
7	1672	40823	0.1415	2012	-340
8	1714	25487	0.1219	2007	-293
9	1732	20158	0.1036	1996	-264
10	1744	16912	0.0862	1987	-244
11	1752	14749	0.0697	1965	-213
12	1766	11502	0.0537	1953	-187
13	1822	2702	0.0381	1950	-129
14	1882	63	0.0227	1942	-60
15	1889	230	0.0076	1895	-6
16	1895	439		1889	
17	1942	4672		1882	
18	1950	5891		1822	
19	1953	6361		1766	
20	1965	8345		1752	
21	1987	12940		1744	
22	1996	14873		1732	
23	2007	17836		1714	
24	2012	19142		1672	
25	2032	25076		1565	
26	2075	40382		1565	
27	2144	73307		1539	
28	2249	140890		1516	
29	2289	172518		1462	
30	2670	634179		1425	
Estadístico					
S^2			2111131		
b			-1420		
SW_c			0.956		
SW_t			0.927		

De la **Tabla 5.5** se puede concluir que el valor del estadístico calculado es mayor al de tablas; por lo tanto, se tiene la evidencia suficiente para aceptar la hipótesis nula, al igual que la etapa anterior los datos se ajustan a una distribución normal.

Se realiza la prueba de normalidad para la segunda etapa y se muestra el resumen de los datos en la **Tabla 5.6**.

Tabla 5.6 Resumen de datos y cálculos de Shapiro-Wilk para la segunda etapa.

i	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	a_{in}	x_i inversa	Dif ($x_i - x_i$ inversa)
1	1378	102147	0.5359	1932	-554
2	1420	77064	0.3325	1928	-508
3	1528	28732	0.2412	1862	-335
4	1529	28326	0.1707	1853	-324
5	1557	19741	0.1099	1829	-272
6	1712	215	0.0539	1776	-64
7	1762	4160	0	1762	0
8	1776	6193		1712	
9	1829	17397		1557	
10	1853	24179		1529	
11	1862	27257		1528	
12	1928	53221		1420	
13	1932	54988		1378	
Estadístico					
S^2			37845572		
b			-635		
SW_c			0.910		
SW_t			0.866		

De la **Tabla 4.9** también se puede concluir que el estadístico calculado es mayor al de tablas y que hay suficiente evidencia estadística para aceptar la normalidad de los datos de producción.

5.1.3.2 Homocedasticidad

Como la prueba de ANOVA supone que las muestras provienen de poblaciones con las mismas varianzas, se realiza una prueba de homocedasticidad con el método de Bartlett. Las hipótesis por probar son:

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ las varianzas de la producción son iguales (Todas las varianzas son iguales)

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2$ las varianzas de producción son diferentes (o por lo menos una varianza es diferente a las demás)

En la **Tabla 5.7** se muestra el resumen de los datos y los resultados de la prueba de Bartlett calculada con Excel (Correa et al, 2006).

Tabla 5.7 Resumen de datos y resultados de la prueba de Bartlett.

Datos	
N	55
k	3
$\sum s_i^2$	297349.9
s_p^2	88811.0
Estadístico	
x_c^2	799.3
x_t^2	5.99

Se observa que el estadístico calculado, x_c^2 , es mayor al de tablas, x_t^2 , por lo que se tiene evidencia estadística que rechaza la hipótesis nula; en otras palabras, los datos no cumplen con la propiedad de homocedasticidad. Sin embargo, este es un requisito poco estricto. El estadístico George E. mostró que la varianza máxima puede ser hasta nueve veces la varianza menor y los resultados del ANOVA seguirán siendo confiables (Triola, 2018). La varianza máxima de los datos de producción es 4.5 veces mayor que la varianza mínima así que se continúa con el ANOVA.

5.1.3.3 ANOVA

Con los resultados obtenidos de la producción mensual, se realiza una prueba de hipótesis de comparación de medias para saber si las mejoras aplicadas aumentaron la producción de la línea. Esta prueba se realiza con un análisis de varianza o ANOVA.

Las hipótesis por probar son:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ las medias de la producción diaria son iguales.

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$ las medias de producción después de las mejoras son diferentes (mayores), por lo menos una de las medias es diferente a las demás.

Por etapa se ocuparon los datos correspondientes a la producción diaria entre el 1º de septiembre del 2017 y el 27 de septiembre del 2018. En la **Tabla 5.8** se muestra

el resumen de los datos que se utilizaron; corresponden a los promedios de los datos de las **Tablas 5.3, 5.5 y 5.6.**

Tabla 5.8 Tabla de resumen de datos para el análisis ANOVA (Calculado con Excel).

Resumen de datos				
Grupos	Número de datos	Suma de producción	Promedio de producción	Varianza
Antes	12	18211	1518	187584.0
Etapa 1	30	56209	1874	72797.6
Etapa 2	13	22062	1697	36968.2

En la **Tabla 5.8** se pueden observar los 3 grupos de datos que serán analizados (uno por cada etapa de mejora), el número de datos ocupados por grupo, así como la suma de producción, el promedio diario de producción y la varianza de cada etapa. En total se tiene 55 datos de las 3 etapas, los grados de libertad de los factores (etapas) serán 2 y los grados de libertad del error 52. Con los datos anteriores se realiza el análisis ANOVA con un nivel de significancia del 5%. El análisis se muestra en la **Tabla 5.9.**

Tabla 5.9 Tabla de resumen de ANOVA (Calculado con Excel).

Resumen de ANOVA					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Error medio cuadrático	F calculada	F de tablas
Entre etapas	1142159.456	2	571079.7	6.430	3.175
Dentro de las etapas	4618174.324	52	88811.0		
Total	5760333.780	54			

En la **Tabla 5.9** se observan los valores de la suma de cuadrados de cada una de las etapas, sus errores medios cuadráticos y los grados de libertad, así como el estadístico *F*. Se observa que *F* calculada es mayor a *F* de tablas, por lo que se puede concluir estadísticamente que los cambios en el proceso han producido cambios en la media. De acuerdo con los resultados estadísticos de la prueba y los valores observados de los promedios de producción diaria de cada una de las etapas, se puede concluir que los cambios efectuados al proceso elevaron la media de producción diaria.

5.2 Nivel sigma

El nivel sigma del proceso indica cuántas desviaciones estándar caben dentro de los límites del proceso. Entre más se acerca el nivel sigma a seis, más cercano es el proceso de considerarse de nivel mundial y la probabilidad de que el producto sea defectuoso es menor. Los datos de producción y defectos correspondientes a

la situación anterior a las mejoras son los comprendidos entre el 1º de septiembre al 14 de noviembre del 2017. Para la primera etapa son los del período del 15 de noviembre del 2017 al 30 de junio del 2018 y para la segunda y última etapa son los del 1º julio al 27 de septiembre del 2018.

Se ejemplifica el cálculo para obtener el nivel sigma del proceso con la etapa de antes y posteriormente se resumen los resultados en una tabla. Como primer paso se calcula los DPU del proceso con la ecuación 16 (página 32), tomando en cuenta la situación antes de la intervención.

$$DPU = \frac{15,531}{87,856} = 0.177 \quad (32)$$

Esto significa que antes de las mejoras una pieza tenía una probabilidad de 17.7% de tener un defecto por unidad. Este porcentaje calculado es de los tres primeros meses en donde no se había realizado ninguna mejora y para calcularlo se utilizó el total de la producción entre el total de los defectos de estos tres meses.

Posteriormente se utiliza un índice más complejo, para ello se ocupa el DPO, su cálculo se realiza con la ecuación 17 (página 32) y como oportunidad se toman 27 defectos posibles que puede tener la pieza. Estos son los defectos que son reportados por el departamento de calidad.

$$DPO = \frac{5,531}{87,856 \times 27} = 0.0065 \quad (33)$$

Otra métrica aparte del DPO es el DPMO, el cual cuantifica los defectos en un millón de oportunidades de error y para ello se utiliza la ecuación 18 (página 33).

$$DPMO = \frac{5,531}{87,856 \times 27} \times 1,000,000 = 6,547 \quad (34)$$

Se puede concluir que, en la situación en que se encontraba el proceso antes de las mejoras, por cada millón de piezas producidas se esperaban tener en total 6,547 defectos. En otras palabras, el proceso está lejos de un nivel Six Sigma que únicamente espera 3.4 DPMO. Para calcular el nivel sigma, se utiliza el rendimiento Y del proceso el cual se calcula con la ecuación 20.

$$Y = e^{-.177} = 0.837 \quad (35)$$

Lo que se interpreta de este resultado es que, en la situación inicial, el proceso tenía una probabilidad del 83.7% de que una unidad esté libre de defectos. El nivel z se obtiene de una Tabla de distribución normal estándar a partir de la probabilidad acumulada de Y . Para este caso, $Y = 0.837$ y el valor en tablas que le corresponde es de $z_y = 0.982$.

De acuerdo con el valor obtenido, se hace un análisis del nivel sigma. Se observa que su nivel sigma es muy bajo, por lo cual se toma la decisión de trabajar sobre el proceso para lograr tenerlo dentro de control y posteriormente efectuar el cálculo de la sigma a largo plazo.

Se puede concluir que el proceso de antes tenía un nivel de 0.982 sigma. En la Tabla 5.10 se muestra un resumen y comparación de las métricas de Six Sigma de cada una de las etapas.

Tabla 5.10 Resumen de cálculos para el nivel Six Sigma.

	Producción	Defectos	Oportunidades	DPU	DPO	DPMO	Y	z_y
Antes	87,856	15,531	27	17.7 %	0.0065	6,547	0.837	0.982
1er etapa	253,107	20,759	27	8.2%	0.0030	3,037	0.921	1.412
2da etapa	115,817	4,079	27	3.5%	0.0013	1,304	0.965	1.812

De la **Tabla 5.10** se puede interpretar que el proceso inició teniendo un 17.7% de probabilidad de tener algún defecto por unidad y con las mejoras implementadas se logró disminuir en primera instancia a un 8.2% y finalmente a un 3.5%. Este último corresponde a 1,304 DPMO. El rendimiento del proceso fue inicialmente del 83.7%. En la primera etapa aumentó a 92.1% y en la última etapa a 96.5%, lográndose aumentar el desempeño del proceso en un 12.8 %.

Por último, del nivel de Six Sigma se puede concluir que el proceso inició con un nivel de sigma 0.982 y con las mejoras que se fueron implementando se logró elevar en primera instancia a un nivel de 1.412 y finalmente un nivel de 1.812 sigmas.

5.3 Análisis costo/beneficio

Con base en los costos requeridos para la producción de la pieza, se puede determinar los beneficios monetarios que obtiene la organización con las mejoras aplicadas. Se realiza un análisis costo-beneficio, en donde se compara el dinero invertido en un principio para realizar el proceso de fabricación de la pieza, con los nuevos costos después de las mejoras. El análisis refleja cuánto beneficio neto se obtuvo.

Para conocer los costos de mano de obra, se acudió al departamento de recursos humanos para solicitar el salario de los operadores y al área de compras para conocer el precio en que se adquiere la materia prima. Debido a que no se cuenta

con suficiente información financiera, dicho análisis se realiza con algunas estimaciones. Se consideran los salarios de los operadores de maquinado, la líder de maquinado, los inspectores de calidad, el costo de la materia prima por pieza, las horas extra de fines de semana y el bono que se paga a los operadores por acudir estos días, la cantidad de piezas que son rechazadas y la cantidad de piezas producidas.

Como beneficios, se considera el ahorro de tiempo extra invertido para entregar la producción, el salario del personal que realiza inspecciones demás por el mal flujo, el aumento del número de piezas producidas y la disminución del porcentaje de piezas rechazadas.

El estudio hace la comparación del proceso en septiembre del 2017 con la situación en agosto del 2018. Los resultados se muestran en la **Tabla 5.11**.

Tabla 5.11 Comparación de costos del antes y después de la mejora.

Concepto	Cantidad		Costo	
	Antes	Después	Antes	Después
Materia prima por pieza	0.370 kg		\$ 13.42	\$ 13.42
Salario de operadores de fundición	4		\$ 24,000.00	\$ 24,000.00
Salario de operadores de troquelado	3		\$ 7,500.00	\$ 7,500.00
Salario de operadores de maquinado	15		\$ 41,100.00	\$ 41,100.00
Salario de líder de maquinado	1		\$ 2,940.00	\$ 2,940.00
Salario de inspectores de calidad	6 inspectores	4 inspectores	\$ 14,880.00	\$ 9,920.00
% rechazo	22.27%	5.31%		
Producción promedio	1314	1769		
Costo por pieza	1		\$ 16.29	\$ 15.43
Tiempo extra maquinado (sábado y domingo)	3	1	\$ 54,243.84	\$ 16,351.28
Costo total mensual			\$ 144,663.84	\$ 101,811.28
Número de personas	29	27		
Producción promedio	1314 pzs	1769 pzs		
Aumento de producción	455 piezas			
Disminución de % de rechazo	16.96%			

En la **Tabla 5.11** se muestra la comparación de los costos para fabricar el Base Bracket Q5. Para conocer el costo del aluminio es necesario pesar las piezas y se obtiene que en promedio cada pieza pesa 0.370 kg. Con el costo estimado de metal, \$36.27/kg, se llega a un costo de \$13.42 por pieza. Este costo no cambia en el tiempo, ya que la pieza pesa lo mismo. Aunque hay otros insumos como lijas, brocas, etc., no se tiene acceso a los costos correspondientes, además de que el aluminio es el que más aumenta al costo. Por esta razón, únicamente se tomó en cuenta el costo del aluminio como materia prima en los cálculos anteriores.

El área de recursos humanos proporcionó la información del salario mensual de la mano de obra; para el costo total por sueldos se multiplica el salario mensual por el número de personas requeridas. Por ejemplo, los operadores de fundición perciben \$1,500 pesos semanales, y se requieren de cuatro personas en el proceso del Base Bracket Q5, correspondiendo a \$6,000 semanales, o \$24,000 mensuales.

El número promedio por piezas producidas antes de la mejora era de 1,314 piezas diarias; aplicando las mejoras aumenta a 1,769 piezas diarias, teniendo un aumento de 455 piezas por día. El aumento de la producción ayuda a disminuir los costos fijos de la pieza.

El costo unitario de la pieza se calcula a partir del costo de materia prima por pieza, el salario de todos los operadores, la líder y los inspectores de calidad implicados en el proceso. La suma del salario de todos ellos antes de la mejora era de \$3,767.50 diarios. Esta cantidad se divide entre la cantidad promedio de piezas producidas (1,314 piezas), siendo igual a \$2.86, más \$13.42 pesos de materia prima es igual a \$16.29 pesos por pieza.

Para los costos aplicados después de la mejora se hacen los mismos cálculos: el salario diario de las personas implicadas en el proceso es de \$3,560.83. Si se divide entre las 1769 piezas diarias, da un resultado de \$2.01 por pieza y sumando los \$13.42 de materia prima se llega a \$15.43 pesos por pieza, implicando un ahorro de \$0.85 por pieza (6.3%).

Adicionalmente, se hace el cálculo del tiempo extra que se paga por trabajar durante el fin de semana, a partir de la información proporcionada por el área de recursos humanos. A los operadores de maquinado se les paga \$33.00 por hora extra, a la líder \$45.94 pesos. Considerando que antes de la mejora se requerían a 15 operadores y una líder, de las cuales cada una asiste durante 12 horas entre sábado y domingo, se llega a un total de \$6,491.28 por fin de semana. Además de su salario, se les otorga un bono de \$400.00 por persona, dando \$6,400.00 más o un total \$12,891.28 en personal de maquinado. Al personal de calidad se le paga \$38.75 pesos por hora extra y se requieren de 6 personas. Considerando las 12 horas y el bono adicional de \$400 por persona, se llega a \$5,190.00 en personal de calidad en un fin de semana.

Después de la mejora se pudieron disminuir 2 personas en el área de calidad, dando como total de \$3,460.00 en personal de calidad, ahorrando \$1,730.00 pesos cada fin de semana.

Con ayuda de estos costos se hizo el análisis de septiembre 2017 comparado con septiembre del 2018, sumando el salario mensual de todos los operadores e

inspectores de calidad con el gasto extra por trabajar fines de semana. De acuerdo con los registros históricos, en septiembre 2017 se trabajaron tres fines de semana mientras que en 2018 únicamente uno, dando como resultado en 2017 un costo total mensual de \$144,663.84, comparado con septiembre de 2018 que tenía un costo mensual total de \$101,811.28, obteniendo un ahorro total de \$42,852.56 mensuales.

Se observa que el porcentaje de defectos en 2017 era el 22.27% del total de las piezas fabricadas, mientras que, después de las mejoras, disminuyó a 5.31% de piezas rechazadas para septiembre del 2018. Esto implica una disminución de defectos del 76%.

5.4 Simulación del proceso

Después de la última mejora se observó una disminución importante de los defectos, pero la producción sigue siendo más bajo de lo deseado. Esto se debe a paros no programados de las máquinas de barrenado y machueleado, provocando que el maquinado pare por completo sus actividades. Para estudiar el probable comportamiento de la producción si las máquinas no fallaran, y analizar su efecto sobre la productividad, se usa como herramienta la simulación, en específico el software *Simio* (Simio 11, 2019).

Para la simulación se consideran todas las estaciones de maquinado, la liberación de calidad y dos máquinas (barrenadora y machueleadora). El modelo en Simio corresponde a una simulación de eventos discretos, considerando que la única entidad que se incluye en el modelo son las piezas, que entran al sistema como producto a procesar y salen como producto terminado. Se consideran las jornadas laborales tanto en horas diarias como los días de trabajo sin horas extras. Se asigna el número real de personas para cada una de las estaciones de trabajo, incluyendo sus tiempos de operación.

Se realizó un estudio de tiempos de dos operadores en 10 ocasiones cada uno, para cada una de las estaciones de trabajo. Debido a que no se cuenta con datos más detallados, se considera una distribución uniforme, y de los 20 tiempos obtenidos se tomó el mínimo y máximo para poder definir cada una de las operaciones. Los tiempos de operación por pieza, usados en el modelo, se muestran en la **Tabla 5.12**.

Tabla 5.12 Tiempos de operación ocupados en la simulación.

Operación	Tiempo mínimo	Tiempo máximo
Limado contorno	25 s	29 s
Barrenado	15 s	21 s
Machueleado	10 s	15 s
Destapado	15 s	18 s
Limado clip	24 s	26 s
Limado machuelo	32 s	40 s
Rasqueteo	10 s	13 s
Sopeteo	10 s	12 s
Inspección	20 s	25 s

5.4.1 Fallas de las máquinas de barrenado y machueleado

Se hizo un análisis de las fallas de las máquinas (barrenado y machueleado), para obtener los tiempos de fallas y sus tiempos de reparación que pueden ser usados en la simulación. Para tal efecto, se determina el tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) y el tiempo medio para reparar (MTTR, por sus siglas en inglés). Se realizó el análisis del número de días en que las máquinas fallaron en una semana específica y se hizo un promedio del tiempo en que se tardaron en reparar cada una de ellas.

Es necesario obtener primero el tiempo total de funcionamiento de las máquinas (TTF, ecuación 24). Para obtener el MTBF y el MTTR, se utilizan las ecuaciones 25 y 26.

La máquina barrenadora trabaja 45 horas por semana, con un promedio de 4.5 fallas por semana y un promedio de tiempo inactivo de 2.7 horas a la semana:

$$TTF = 45h - 2.7h = 42.3 h \quad (36)$$

$$MTBF = \frac{42.3 h}{4.5 fallas} = 9.4 h \quad (37)$$

$$MTTR = \frac{2.7 h}{4.5 fallas} = 0.6 h \quad (38)$$

Por lo tanto, el tiempo medio entre fallos para la máquina barrenadora es de 9.4 horas por semana y el tiempo medio de reparación de las fallas de la máquina es de 0.6 horas por cada una. En la **Tabla 5.13** se resumen los datos de ambas máquinas.

Tabla 5.13 Resumen de datos de las máquinas.

	Máquina barrenadora	Máquina machueleadora
Tiempo total	45 h	
Tiempo total de funcionamiento	42.3 h	43.5 h
Tiempo total de inactividad	2.7 h	1.5 h
Número de fallas	4.5	2
MTBF	9.4 h	21.75 h
MTTR	0.6 h	0.75 h

Estos datos se introducen en el modelo de simulación para observar el comportamiento de la línea de producción y comparar los resultados de este escenario con la situación real.

5.4.2 Probabilidad de rechazo

Para lograr que el modelo de simulación se apegue lo más posible a la realidad se incluye el número de piezas rechazadas. Con los datos previamente recopilados se calcula la probabilidad del número de defectos que se detectan en un turno de 8 horas, que corresponde al período laboral diario de maquinado.

Se hace el análisis de los datos de defectos del 1º de junio de 2018 al 27 de septiembre del 2018, que es la etapa en que se trabajó con el nuevo acomodo del área de maquinado. El histograma de los valores obtenidos se muestra en la **Figura 4.38**. Se observa que la gráfica no tiene inicio en 0 defectos ya que todos los días se están rechazando piezas, y que el número de piezas defectuosas encontradas está entre 12 y 100.

El histograma se ajusta aproximadamente a una distribución triangular. El ajuste teórico de esta curva a una función de densidad será usado para encontrar la probabilidad del número de defectos en las corridas de la simulación. Para encontrar la función de densidad se construye un polígono, trazando una recta a través de la marca de clase de cada una de las columnas y comenzando en el punto (17.5,12) (ver **Tabla 5.14**).

Para definir la ecuación se requiere la pendiente de la recta, que se obtiene con los puntos P1 (17.5,12) y P2 (50.5, 14) para el primer segmento y con los puntos P2 (50.5, 14) y P3 (94.5, 2) para el segundo tramo. La pendiente del primer tramo corresponde a $m_1 = 0.0606$ y la del segundo tramo a $m_2 = -0.2727$. Con las pendientes se calcula el valor teórico de la frecuencia de cada uno de los defectos. La **Tabla 5.14** muestra un resumen de los datos.

Tabla 5.14 Resumen de datos para la función de densidad.

Frecuencia	X	Frecuencia relativa	Frecuencia teórica
12	17.5	0.154	12
13	28.5	0.167	12.667
14	39.5	0.179	13.333
14	50.5	0.179	14
11	61.5	0.141	11
7	72.5	0.090	8
4	83.5	0.051	5
3	94.5	0.038	2

Con estos datos, se lleva a cabo la construcción de la gráfica para obtener la función de distribución. Para la gráfica se toma en cuenta que X es igual a la marca de clase y Y será el valor esperado. La gráfica se muestra en la **Figura 5.4**.

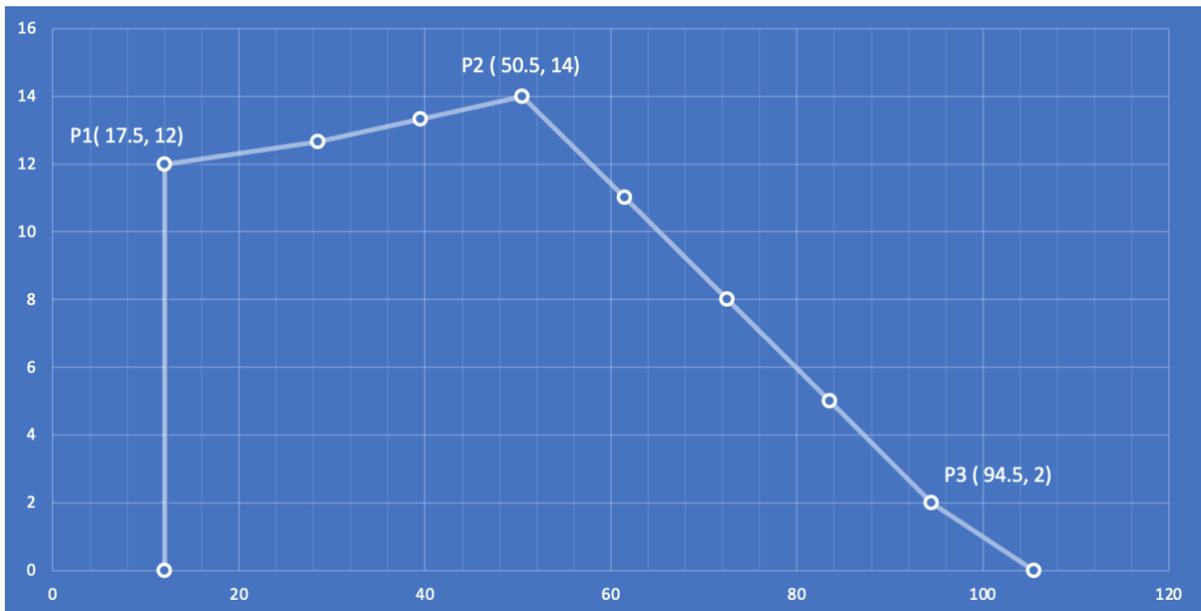


Figura 5.4 Histograma y polígono de frecuencias de defectos por día. Fuente: Elaboración propia (2019).

El polígono de frecuencias representa la unión de las marcas de clase del histograma y sobre el mismo se realizan los cálculos para conocer su función de densidad.

Igualando el área abajo del polígono de frecuencias a 1, se encuentra el factor de escalamiento k requerido para definir la densidad de probabilidades

El área del primer tramo (valores de 12 a 50.5 en X) es:

$$a_1 = \frac{14k + 12k}{2} \times 38.5 = 500.5k \quad (39)$$

El segundo tramo del polígono va del punto 50.5 a 105.5, su área es:

$$a_2 = \frac{55 \times 14k}{2} = 385k \quad (40)$$

La suma de las dos áreas calculadas se igualan con 1, dando como factor de escalamiento:

$$500.5k + 385k = 1 \quad (41)$$

$$k = \frac{1}{885.5} \quad (42)$$

Haciendo los cálculos correspondientes, la función de densidad queda definida de la siguiente manera:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{0.0023x + .4924}{38.5} & \text{para } 12 < x < 50.5 \\ \frac{-0.0158x + 1.666}{55} & \text{para } 50.5 < x < 105.5 \end{cases} \quad (43)$$

Se comparó la densidad de probabilidad anterior con los valores empíricos del histograma mediante una prueba de bondad de ajuste que fue aceptada, indicando que la función de densidad teórica representa en forma adecuada el número diario de piezas defectuosas del proceso. Integrando las funciones de la ecuación (43) se obtiene la función de distribución correspondiente:

$$F(x) = \begin{cases} 0.00002987x^2 + 0.01284x - 0.1577 & \text{para } 12 < x < 50.5 \\ -0.000143x^2 + 0.03026x - .599 & \text{para } 50.5 < x < 105.5 \end{cases} \quad (44)$$

Cabe mencionar que, de acuerdo con los datos observados en el proceso, siempre se tendrá un mínimo de 12 productos rechazados diariamente. La función de distribución permite generar números aleatorios de piezas defectuosas para el proceso en el modelo de simulación, como se verá más adelante.

5.4.3 Modelo de simulación

Con la información recolectada, los cálculos generados y la observación del proceso, se realiza el modelo de simulación. La programación del modelo requiere de la creación de 1 entidad, 2 máquinas, 6 estaciones de trabajo, 1 estación de calidad, 3 variables de estado y 2 propiedades. La **Figura 5.5** conceptualiza el modelo de simulación.

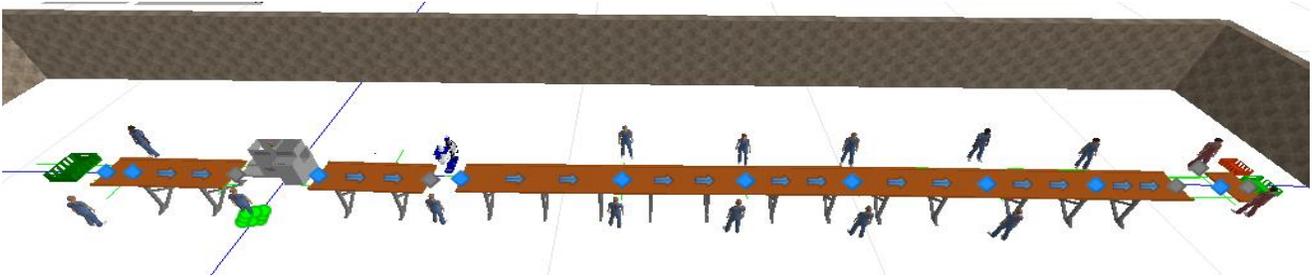


Figura 5.5 Modelo de simulación. Fuente: Elaboración propia (2019).

Se corre el modelo del 16 de julio del 2018 al 26 de septiembre del 2018, considerando semanas laborales de 5 y con un turno diario de 8 horas; el resultado es comparado con los mismos días en el sistema real. En cada una de las estaciones se programan dentro del modelo los tiempos de operación previamente mostrados en la **Tabla 5.12**, y se toma en cuenta el número de personas, que pueden ser 1 o 2 operadores por estación de trabajo dependiendo la operación, para programar el modelo.

Se introducen en el modelo los valores calculados de tiempo medio entre fallos y tiempo medio entre reparaciones de las máquinas, simulando las fallas y reparaciones de las máquinas cuando la línea está trabajando. Las fallas se simulan en horarios laborales ya que no se cuenta con un mantenimiento preventivo y los paros de la maquinaria afectan directamente a la producción diaria. Se simulan diferentes escenarios, variando a fallas programadas.

Para que el modelo de simulación genere un número simulado de piezas defectuosas, se genera un número aleatorio entre 0 y 1, en donde el 0 representa el 0% y 1 el 100% de la probabilidad acumulada de obtener X defectuosos en el proceso. Este número aleatorio es usado para determinar mediante la ecuación 44 el número de piezas defectuosas, aplicando la inversa de la función de distribución.

Así, por ejemplo, si el número aleatorio fuera 0.5, el número de defectuosos correspondería a la mediana de la distribución empírica. El número de piezas defectuosas se define en la simulación para cada ciclo de 8 horas, que corresponden a un día laboral.

Se analizaron 4 escenarios:

- **Escenario 1:** Falla de las máquinas de acuerdo con el MTBF y MTTR obtenidos en campo.
- **Escenario 2:** Falla únicamente de machuelo.
- **Escenario 3:** Falla únicamente de barreno.
- **Escenario 4:** No existen fallas en las máquinas (corresponde al caso en que se realizan mantenimientos preventivos al finalizar los turnos regulares; en este caso se espera no tener fallas).

Para analizar si el modelo es una representación del sistema real, es necesario determinar un número de replicas que den un nivel de confianza sobre el resultado de la simulación. Se elige una muestra piloto de 15 corridas y se utiliza la ecuación 22 para obtener el margen de error.

El margen de error es un intervalo a partir del cual puede oscilar un resultado comparado con el real. A través de los datos históricos de producción de los meses de julio – septiembre del 2018 se obtuvo la moda de producción, que es el valor que más se repite, esto con el objetivo de comparar la situación real con la simulada, lo que resultó en 2,000 piezas diarias.

Se realizó la simulación preliminar y se corrió 15 veces, lo que generó un resultado de 2,611 piezas (esto representa la producción de un día). Para obtener el error se realizó una resta entre el valor real menos el valor de la simulación, dando un margen de error de 611 piezas.

Simio calcula la desviación estándar de las 15 corridas que se programaron, para conocer el número de corridas necesarias. El estadístico t-student de tablas se ocupa con un $\alpha = 5\%$ y $gl = 14$.

Donde:

$$S = 1,267$$

$$\mathcal{E} = 611$$

$$t_{5\%/2,14} = 2.145$$

$$N = \left(\frac{1267}{611} 2.145 \right)^2 = 19.78 \approx 20 \text{ corridas} \quad (45)$$

Con esto se determina que son necesarias 20 corridas para que la simulación tenga un estado lo suficientemente estable.

5.4.4 Escenarios de simulación

El modelo de simulación se programó con los datos mostrados previamente del tiempo medio entre fallas y tiempo medio de reparaciones. La **Figura 5.6** muestra la comparación de piezas producidas y piezas rechazadas en los 3 meses simulados, comparados con el sistema real.



Figura 5.6 Comparación de sistema real y escenarios de simulación. Fuente: Elaboración propia (2019).

En la **Figura 5.6** se observa que hay una mayor producción de piezas simuladas en los 4 escenarios en comparación con la producción real. Esta diferencia se debe a varios factores que influyeron directamente a la producción del sistema real, entre ellos la máquina de inyección tuvo reparaciones en esas fechas, como consecuencia no se tuvo el 100% de producción en inyección. Otro factor fue que la línea de producción tuvo que apoyar con otras piezas por urgencias de producción.

También se puede observar que el número de piezas rechazadas en la simulación de la situación real (escenario 1) es cercano al número de piezas defectuosas reales. Estas piezas defectuosas se generan en el modelo de simulación a través

de un número aleatorio entre 0 y 1, que representa la probabilidad del número de piezas rechazadas, como se explicó en la sección anterior.

El escenario 2 simula la situación en que únicamente exista la falla de la máquina machueledora, tomando en cuenta los mismos tiempos de falla previamente mencionados. Esto con la finalidad de comparar y conocer el impacto que tiene la falla de esta. Comparando el escenario 1 con el escenario 2 en donde solo existe la falla de la máquina machueledora, la producción tiene un incremento de 4,875 piezas en comparación con el escenario 1 de la simulación, lo que quiere decir que, si se puede mantener la máquina barrenadora sin paros durante el horario laboral, se espera que aumente el número de piezas producidas.

En el escenario 3 únicamente existe la falla de la máquina barrenadora. Se observa en la **Figura 5.6** que, comparando con los valores de producción del escenario 1, se producen solamente de 128 piezas más, en promedio, que en la situación actual. En otras palabras, las fallas de la máquina barrenadora son las que impiden elevar la productividad, independientemente de que falle la máquina machueledora o no. Esto se debe a que la máquina barrenadora presenta fallas cada 9.4 horas, casi 2.5 en comparación con la máquina machueledora.

El escenario 4 muestra un estado ideal, en el que se simula que no existen las fallas de ninguna máquina durante el turno de trabajo. Con este escenario se analizan las ventajas de no tener paros inesperados en la línea de producción. Se comparan los escenarios anteriores con el escenario 1 que es el que representa al sistema real; se espera tener una producción de 4,915 piezas más, lo que quiere decir que tener las dos máquinas sin paros inesperados elevaría la producción en un 3.5%, mientras que el rechazo se eleva en un 1.6%. Hay que recordar que aquí se están tomando en cuenta todos los defectos, no solo los generados por máquinas de acuerdo con la probabilidad calculada previamente.

En el análisis de costo-beneficio se compara el escenario 1 que se basa en el estado real vs. el escenario 4 que es un estado ideal de la línea de producción. Se eligieron estos dos escenarios ya que uno corresponde a la situación actual de la línea con las fallas y el escenario 4 es un escenario en el cual sería la forma ideal de trabajar sin paros inesperados. En la **Tabla 5.15** se muestra una Tabla de costo-beneficio para los 3 meses que se simularon, esto con el fin de que se observen en forma cuantitativa las ventajas de tener una línea de producción sin paros en las máquinas.

Tabla 5.15 Costo-beneficio de escenario 1 vs escenario 4.

Concepto	Escenario 1	Escenario 4	Escenario 1	Escenario 4
	Cantidad		Costo	
Materia prima por pieza	0.370 kg		\$13.42	
Salario de los operadores de fundición	4		\$72,000.00	
Salario de los operadores de troquelado	3		\$22,500.00	
Salario de los operadores de maquinado	15		\$123,300.00	
Salario de la líder de maquinado	1		\$8,820.00	
Salario de los inspectores de calidad	4		\$29,760.00	
Producción	138358	143273		
Costo por pieza	1	1	\$15.27	\$15.21
Costo en 3 meses simulados	138358	143273	\$2,113,144.36	\$2,179,103.66
Beneficio	\$65,959.30			
Aumento de producción	4,915 piezas			

Para los cálculos de la Tabla se muestran los salarios de las personas que trabajan directamente para fabricar la pieza; en estos no hay ningún cambio. La diferencia consiste en el número de piezas producidas, impactando directamente en el costo por pieza. Producir más piezas en el mismo tiempo impacta en los costos fijo, por lo que se obtiene un ahorro de \$0.06 por pieza y una diferencia de ganancia en tres meses de \$65,959.30. Si se divide esta ganancia entre los 3 meses, se estima que la empresa obtendría una ganancia de \$21,986.43 por mes, lo que quiere decir que ganaría un 3.12% más.

En **Tabla 5.16** se muestra una comparación de costo beneficio de 3 meses de la situación real vs. los 3 meses del escenario 4, en donde la línea de producción funciona en forma ideal.

Tabla 5.16 Costo beneficio real vs ideal.

Concepto	Real	Escenario 4	Real	Escenario 4
	Cantidad		Costo	
Materia prima por pieza	.370 kg		\$13.42	
Salario de operadores de fundición	4		\$72,000.00	
Salario de operadores de troquelado	3		\$22,500.00	
Salario de operadores de maquinado	15		\$123,300.00	
Salario de líder de maquinado	1		\$8,820.00	
Salario de inspectores de calidad	4		\$29,760.00	
Producción	115817	143273		
Costo por pieza	1	1	\$15.43	\$15.21
Costo en 3 meses simulados			\$1,787,056.31	\$2,179,103.66
Beneficio	\$392,047.35			
Aumento de producción	27,456 piezas			

De la **Tabla 5.16** se puede observar que la diferencia de piezas producidas es de 27,456 , lo que representa el 22% más cuando no hay paros que en el estado real simulado. Asimismo, se observa que el costo por pieza en un estado ideal disminuye con \$0.22, esto se debe a que el aumento de producción disminuye los costos fijos. Obteniendo así una ganancia de \$392,047.35 en estos 3 meses. Si se divide este beneficio entre los 3 meses se obtiene que la empresa obtendría \$130,682.45 más por mes. En comparación con el beneficio que se obtuvo de \$42,852.56 por mes en la situación real de la **Tabla 4.13**.

Por los resultados anteriores, se observa la importancia de mantener los equipos en buen estado, se recomienda implementar una metodología de mantenimiento productivo total, conocido como TPM. Este programa de mantenimiento no incrementa el costo de la pieza, ya que el personal de mantenimiento cuenta con turnos que cubren las 24 horas del día, por lo que siempre hay personal disponible sin necesidad de pagar tiempo extra.

Se propone tener un buen mantenimiento preventivo de las máquinas, haciendo un estudio de sus fallas principales y aplicando este programa en horarios después de que la maquinado acabe su turno. Lo anterior tiene como propósito que durante el

horario productivo no falle ninguna de las dos máquinas y que todos sus mantenimientos preventivos ocurran después del horario laboral, evitando así cualquier tipo de paro.

Conclusiones

En el presente trabajo, se logró alcanzar el objetivo de identificar las áreas de oportunidad en el área de producción de la empresa PRODDI. Se confirma que con los resultados logrados la implementación de una metodología de mejora continua se vuelve fundamental en cualquier empresa para tener un mejor uso de todos sus recursos aprovechándolos al máximo.

Se confirma que el uso de las herramientas de calidad y sus buenas prácticas ayudan a obtener buenos resultados aumentando la productividad y competitividad de las empresas, sin importar su tamaño de estas.

Al utilizar metodología DMAIC fue posible clasificar las causas principales de los errores del proceso para encontrar las mejores soluciones y así evitar su reaparición. Con la ayuda de las medidas de control es posible mantener los procesos, conformes y en constante mejora. Con la aplicación de la metodología se logró incrementar la eficiencia del proceso en un 12.8% obteniendo un costo-beneficio de \$42,852.56 mensual.

La implementación de esta metodología ayudó a tener un mejor orden en la planta y en sus procesos, con esto se logró que los operadores tuvieran un mejor manejo de material, un flujo bien definido y un mejor ambiente laboral. Se constató que la estandarización es fundamental para tener un buen control del proceso.

También se observó que la definición correcta del proyecto, así como, del problema en el cual se va a trabajar es fundamental, para poder concentrar todos los recursos y herramientas necesarias para actuar sobre los principales problemas y no sobre los problemas que van saliendo esporádicamente, generando que se solucionen de momento y no definitivamente encontrando su causa raíz.

La puesta en práctica de la metodología confirmó que un área encargada del desarrollo de mejora continua trae grandes ventajas cuando son bien aplicadas las herramientas de calidad, y que esta es una parte fundamental de la estrategia de la organización para lograr una alta calidad y confiabilidad en sus productos o servicios.

Otra herramienta muy importante que se utilizó fue la simulación, ya que en ella se aprecia el comportamiento de maquinado con diferentes escenarios, la importancia de la simulación es hacer cambios en un sistema real, buscando predecir el comportamiento de este sistema sin arriesgar el sistema en una situación real, evitando pérdidas.

La simulación también ayuda a predecir el comportamiento, observa si los cambios propuestos tendrán una mejora significativa sobre el estado real y si estos van a ser rentables para la empresa.

Recomendaciones

Como primera recomendación a la empresa, se propone realizar un estudio profundo sobre las máquinas que intervienen en la línea del Base Bracket Q5 para poder aplicar una metodología TPM y obtener mayores beneficios tanto en costo, como en ambiente laboral, ya que los paros continuos no programados de las máquinas estaban generando estrés en los operadores de maquinado.

También se recomienda seguir implementando la metodología DMAIC no solo sobre la línea del Base Bracket Q5, si no ampliarla a todas las líneas de producción con las que cuenta la empresa, para obtener mejores resultados y más efectivos.

Se recomienda además que exista un departamento con personal específicamente para realizar estos proyectos de mejora continua.

Otra recomendación es monitorear los procesos y los controles implementados constantemente, ya que el cambio cultural en una empresa siempre es difícil por la resistencia del personal y el miedo al cambio y lo que se tiene que realizar poco a poco. Se recomienda una gran comunicación entre los departamentos de la empresa para que los problemas y proyectos que existan en ellos se resuelvan de mejor forma con un equipo multidisciplinario.

Bibliografía

- Arias Aranda Daniel y Minguela Rata Beatriz (2018). Dirección de la producción y operaciones. Pirámide, Primera edición.
- Barba Enric, Boix Francesc y Cuatrecasas Lluís (2001). Six Sigma una iniciativa de calidad total. Gestión 2000.
- Besterfield Dale H. (2009). Control de calidad. Pearson, Octava edición.
- Breyfogle III Forrest W (1999). Implementing Six Sigma. Ed. John Wiley & Sons.
- Camisón Cesar, Cruz Sonia y González Tomás (2009). Gestión de la calidad: Conceptos, enfoques, modelos y sistemas. Pearson.
- Carro Paz Roberto y González Gómez Daniel (2000). Administración de las operaciones. Universidad Nacional de Mar del Plata, Primera edición.
- CONDUSEF (2015, febrero 26), Educación financiera, PYMES, recuperado de: <https://www.condusef.gob.mx/Revista/index.php/usuario-inteligente/educacion-financiera/492-pymes>
- Correa Juan Carlos., Iral René Y Rojas Lucina (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. Revista Colombiana de Estadística, vol. 29 N° 1, pp. 57-76.
- Doyle E. Laurence (1988). Procesos y materiales de manufactura para ingenieros. Prentice Hall Hispanoamericana, Tercera edición.
- Escalante Vázquez E. (2006). Análisis y mejoramiento de la calidad. Limusa, Primera edición.
- Escalante Vázquez E. (2008). Six Sigma metodología y técnicas. Limusa, Primera edición.
- Evans R. James y Lindsay M. William (2014). An introduction to six sigma and process improvement. Wadsworth Publishing Co Inc, Second Edition.
- Felizzola Heriberto y Luna Carmen (2014). Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico. Ingeniare, vol. 22 N° 2, 2014, pp. 263-277, 2014.
- Flores de la Mota Idalia, Figueras Jaume, Guasch Antoni, Mújica Miguel Antonio, Narciso Mercedes y Piera Miquel Ángel (2013). Modelos de simulación usando simio y redes Petri. UNAM.
- Freund E. John, Miller Irwin y Miller Maryless (2006). Estadística matemática con aplicaciones. Pearson, Sexta edición.
- Griflu E. Y Canela M. (2002). Gestión de la calidad. Ediciones UPC.
- Guasch Antoni, Piera Miquel Ángel, Casanovas Josep y Figueras Jaume (2005). Modelado y simulación aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. Alfaomega, Primera edición.
- Gupta C. Bisham y Walker H. Fred (2007). Statistical Quality Control for the Six Sigma Green Belt. ASQ Quality Press.

- Gutiérrez Pulido Humberto (2010). Calidad total y productividad. Mc Graw Hill, Tercera edición.
- Gutiérrez Pulido Humberto y de la Vara Salazar Román (2009). Control estadístico de calidad y Six Sigma. Mc Graw Hill, Segunda edición.
- Herrera Acosta Roberto y Fontalvo Herrera José (2011). Six Sigma. Métodos estadísticos y sus aplicaciones. B – EUMED.
- Hostoani K. (1992) The QC problem solving approach. 3ª Corporation.
- Hurga Castro Carmen, Abad González Julio y Blanco Alonso Pilar (2012). El papel de la estadística en la metodología six sigma. Una propuesta de actuación en servicios sanitarios. Pecvenia monográfico, No. 2012, pp. 111-136.
- Índice revista de estadística y sociedad (2014). Quién es quién. Universidad Autónoma de Madrid, No. 58, pp. 2.
- Juárez Pilar (19 de marzo del 2016). Metalmecánica, sector con valor de 7 mil mdd anuales. Milenio.
- Kelton W. David, P. Sadowski Randall y T. Sturrock David (2008). Simulación con software Arena. Mc Graw Hill, Cuarta edición.
- Kenneth H. Rose (2008) Gestión de calidad de proyectos: Qué, cómo y por qué. Panamericana editorial.
- Marin-Garcia, J.A., Prado del Val M. Y Bonavia T. (2008). La mejora continua como innovación incremental. El caso de una empresa industrial española. Economía industrial, 368, pp. 155-169.
- Montgomery Douglas (2004). Control estadístico de la calidad. Limusa, Tercera edición.
- Moreno M. Tania (1 de julio del 2009). México reclasifica a las PYMES. Expansión.
- Niebel Benjamín W. y Andris Freivalds (2009). Ingeniería Industrial Métodos, estándares y diseño del trabajo. Mc Graw Hill, Duodécima edición.
- Peinado Lara Fernando (2008). Código de Hammurabi. Tecnos, Cuarta edición.
- PROMEXICO (2016, febrero 18), Automotriz, recuperado de: <https://www.gob.mx/promexico/acciones-y-programas/automotriz>
- Pyzdek Thomas y Keller Paul (2010). The Six Sigma Handbook. Mc Graw Hill, Tercera edición.
- Schey John A. (2002). Procesos de manufactura. Mc Graw Hill, Tercera edición.
- Shankar Rama (2009). Improvement using six sigma a DMAIC guide. ASQ Quality Press.
- Simio 11 [Software] (2006-2019). Recuperado de: www.simio.com

- Socconini Luis (2008). Lean manufacturing paso a paso. Norma, Primera edición.
- Triola F. Mario (2018). Estadística. Pearson, Duodécima Edición.
- Torres Vega Pedro J. (2016). Simulación de sistemas con el software arena. Fondo Editorial, Primera edición.
- Villaseñor Alberto (2017). Manual de Lean manufacturing guía básica. Limusa, Primera edición.
- Walpole Ronald E., Myers Raymond H. y Ye Keing (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Pearson, Novena Edición.