



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO DMAIC PARA REDUCIR LA  
VARIABILIDAD EN LA CARACTERÍSTICA DE *RUNOUT* EN LA CARA  
DE LA BRIDA EN EL PROCESO DE MAQUINADO DEL ÁRBOL DE  
LEVAS”**

**TESIS PROFESIONAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**PRESENTA  
IBQ. PEDRO EDUARDO GODÍNEZ SALAZAR**

**DIRECTOR DE TESIS  
M.C. MOISÉS TAPIA ESQUIVIAS**

**CODIRECTOR  
M.C. ALICIA LUNA GONZÁLEZ**

Celaya Guanajuato México

**Asunto: Autorización de impresión de trabajo profesional.**

Celaya Gto., **03 DICIEMBRE 2018**

**M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL.**  
**Presente.**

De acuerdo a la convocatoria hecha por esta jefatura a fin de aprobar o no la impresión del trabajo:

**“Aplicación del método DMAIC para reducir la variabilidad en la característica de runout en la cara de la brida en el proceso de maquinado del árbol de levas”**

Presentado por el (a) pasante **C. ING. PEDRO EDUARDO GODINEZ SALAZAR (M1603073)** ALUMNO (a) del programa de Maestría en Ingeniería Industrial que ofrece nuestro Instituto.

Hacemos de su conocimiento que éste jurado ha tenido a bien aprobar la impresión de dicho trabajo para los efectos consiguientes.

**M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS**  
Presidente

**DR. JOSÉ ANTONIO VAZQUEZ LOPEZ**  
Vocal

**ATENTAMENTE**



SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL  
DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE CELAYA  
COORDINACIÓN DE MAESTRÍA  
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**M.C. MANUEL DARIO HERNANDEZ RIPALDA**  
Secretario

**M.C. VICENTE FIGUEROA FERNANDEZ**  
Vocal Suplente

Cop. Escolaridad  
Archivo.  
VFF\*MTE\*DVP



Aniversario  
TecNM  
en Celaya  
1943-2018

Antonio García Cubas Pte. #600 esq. Av. Tecnológico Col. Alfredo V.  
Sorfil C.P. 38010  
Celaya, Gto. AP. 57, Comutador: (461) 6117575, Correo electrónico:  
[lince@itcelaya.edu.mx](mailto:lince@itcelaya.edu.mx)  
[www.itcelaya.edu.mx](http://www.itcelaya.edu.mx)



## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Ma. Graciela Salazar Vallejo y Pedro Godínez Núñez por todo sus apoyo y amor que me han brindado toda mi vida y por ser artífices de que emprendiera los estudios de maestría.

A mi hija Ivanna Sofía que con su sonrisa y amor me motivó a concluir esta etapa.

A mi asesor de tesis el M.C Moisés Tapia Esquivias, su paciencia, dedicación y apoyo en cada momento de la maestría. Por su gran comprensión en los momentos difíciles que pase, fue un gran aliciente para continuar.

A mis compañeros que estuvieron conmigo durante la maestría y por su apoyo, Mayra, Gaby, Alex, Memo, Carlos.

A Julián Ferrer y Oscar Téllez por su apoyo para ajustar mis tiempos y poder concluir los estudios.

A Vicente y José Antonio por su apoyo en cada inicio de semestre.

## **RESUMEN**

El siguiente trabajo tiene como meta disminuir el porcentaje de defectos que tiene una empresa que se dedica a maquinar piezas para la industria automotriz, utilizando para ello la implementación de la metodología DMAIC. Primeramente se plantea el problema que tiene la empresa y su alto porcentaje de defectos en la fabricación del árbol de levas por culpa del runout en las caras de la brida. Se definen los objetivos, la hipótesis y se justifica el proyecto. En el marco teórico se presenta la información de la metodología, orígenes, etapas, herramientas estadísticas que se utilizan, así como también ejemplos de artículos donde se demuestra la aplicación de la metodología DMAIC y sus resultados.

Se recopiló información de la línea de producción que maquina el árbol de levas empleado herramientas estadísticas que nos proporcionaron los datos necesarios para generar y organizar ideas, así como la medición de las variables del proceso. Se determinó la operación crítica del proceso, se investigaron los factores que causan mayor variabilidad, y se gestionaron soluciones.

## **ABSTRAC**

The following work aims to reduce the percentage of defects that has a company that is dedicated to machining parts for the automotive industry, using the implementation of the DMAIC methodology. Firstly, the problem that the company has and its high percentage of defects in the manufacture of the camshaft due to the runout in the faces of the flange. The objectives, the hypothesis are defined and the project is justified. In the theoretical framework, the information on the methodology, origins, stages, statistical tools that are used is presented, as well as examples of articles that demonstrate the application of the DMAIC methodology and its results.

Information from the production line that machines the camshaft was collected using statistical tools that provided us with the necessary data to generate and organize ideas, as well as the measurement of the process variables. The critical operation of

the process was determined, the factors causing the greatest variability were investigated, and solutions were managed.

# ÍNDICE

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| AGRADECIMIENTOS .....                    | i  |
| RESUMEN .....                            | ii |
| ABSTRAC .....                            | ii |
| ÍNDICE .....                             | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                  | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                   | vi |
| Capítulo 1 MARCO DE REFERENCIA.....      | 8  |
| 1.1 INTRODUCCIÓN .....                   | 8  |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....     | 9  |
| 1.3 OBJETIVOS.....                       | 10 |
| 1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....              | 10 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....        | 10 |
| 1.4 HIPÓTESIS .....                      | 10 |
| 1.5 JUSTIFICACIÓN .....                  | 11 |
| 1.6 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....     | 12 |
| 1.7 ALCANCE Y LIMITACIONES.....          | 13 |
| Capítulo 2 MARCO TEÓRICO .....           | 14 |
| 2.1 SEIS SIGMA .....                     | 16 |
| 2.2 MÉTRICAS DE SEIS SIGMA .....         | 18 |
| 2.2.1 MÉTRICAS PARA ATRIBUTOS.....       | 18 |
| 2.2.2 MÉTRICAS PARA RENDIMIENTO .....    | 19 |
| 2.2.3 MÉTRICAS PARA EL NIVEL SIGMA ..... | 20 |

|                              |                                            |    |
|------------------------------|--------------------------------------------|----|
| 2.3                          | METODOLOGÍA DMAIC .....                    | 22 |
| 2.4                          | ESTADO DEL ARTE .....                      | 25 |
| Capítulo 3 METODOLOGÍA ..... |                                            | 26 |
| 3.1                          | MÉTODO .....                               | 26 |
| 3.2                          | FASE DE DEFINICIÓN .....                   | 26 |
| 3.2.1                        | SELECCIÓN DE CTQ .....                     | 26 |
| 3.3                          | FASE DE MEDICIÓN .....                     | 27 |
| 3.4                          | FASE DE ANÁLISIS.....                      | 30 |
| 3.4.1                        | ESTUDIO DE CAPACIDAD DE PROCESO .....      | 30 |
| 3.4.2                        | DEFINIR LOS OBJETIVOS DE DESEMPEÑO .....   | 34 |
| 3.4.3                        | IDENTIFICAR LAS FUENTES DE VARIACIÓN ..... | 34 |
| 3.5                          | FASE DE MEJORA.....                        | 35 |
| 3.5.1                        | TAMIZAR LAS CAUSAS POTENCIALES .....       | 35 |
| 3.5.2                        | PUNTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN.....             | 36 |
| 3.5.3                        | TOLERANCIAS DE OPERACIÓN .....             | 36 |
| 3.6                          | FASE DE CONTROL .....                      | 37 |
| 3.6.1                        | VALIDAR EL SISTEMA DE MEDICIÓN .....       | 37 |
| 3.6.2                        | DETERMINAR CAPACIDAD DE PROCESO .....      | 37 |
| 3.6.3                        | IMPLANTAR CONTROLES DE PROCESO .....       | 38 |
| Capítulo 4 RESULTADOS.....   |                                            | 39 |
| 4.1                          | FASE DE DEFINICIÓN .....                   | 39 |
| 4.2                          | FASE DE MEDICIÓN .....                     | 39 |
| 4.3                          | FASE DE ANÁLISIS.....                      | 43 |
| 4.3.1                        | ESTUDIO DE CAPACIDAD .....                 | 44 |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 4.4 FASE DE MEJORA.....                     | 45 |
| 4.5 FASE DE CONTROL .....                   | 48 |
| ANEXO A. Hoja de Proceso Operación 60 ..... | 50 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                          | 51 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 Árbol de levas. Fuente (arbomex.com.mx).....            | 12 |
| Figura 2.1 Metodología DMAIC. Fuente (Gutiérrez Pulido, 2010)..... | 23 |
| Figura 3.1 Diagrama de flujo del método .....                      | 26 |
| Figura 3.2 Datos de las mediciones .....                           | 30 |
| Figura 3.3 .....                                                   | 31 |
| Figura 3.4 .....                                                   | 32 |
| Figura 3.5 .....                                                   | 32 |
| Figura 3.6 Nivel sigma objetivo para el proceso.....               | 34 |
| Figura 3.7 Orden de las corridas del DOE .....                     | 36 |
| Figura 4.1 Mapa de proceso de la pieza Mx-618 .....                | 40 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1 Comparación de los gurús de calidad. Fuente (Robert & Chase, 2014)....                                | 15 |
| Tabla 2.2 Las Siete herramientas de control de la calidad. Fuente (Schroeder, Goldstein, & Johnny, 2011). ..... | 15 |
| Tabla 2.3 Capacidad del proceso Seis Sigma. Fuente (Lucas, 2002).....                                           | 17 |
| Tabla 2.4 Métricas Seis Sigma (Pérez Urrego, Peláez Zuñiga, & Carrión García, 2013). .....                      | 19 |
| Tabla 2.5 Métricas de rendimiento. Fuente (Pérez Urrego, Peláez Zuñiga, & Carrión García, 2013). .....          | 19 |



|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.1 Valores de corte para los sistemas de medición. Fuente (Automotive Industry Action Group, 2010). ..... | 28 |
| Tabla 3.2 Valores de corte de los sistemas de medición en función de $\rho$ . .....                              | 29 |
| Tabla 3.3 Datos históricos del runout de 110 árboles de levas en mm. ....                                        | 30 |
| Tabla 3.4 Datos normalizados del runout de 110 árboles de levas. ....                                            | 33 |
| Tabla 3.5 Factores y variables de respuesta del DOE. ....                                                        | 35 |
| Tabla 3.6. Datos del runout de 100 árboles de levas. ....                                                        | 37 |

# Capítulo 1 MARCO DE REFERENCIA

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La metodología de Seis Sigma es una estrategia de mejora continua enfocada al cliente que minimiza defectos y la variabilidad para obtener 3.4 defectos por millón de oportunidades en el diseño de un producto, en la producción y procesos administrativos. Seis Sigma es la estrategia de mejora continua de una organización que busca eliminar las causas de los errores, defectos y retrasos en la organización (Valles, Sánchez, Noriega, & Gómez Nuñez, 2009).

El objetivo principal de la iniciativa de Seis Sigma es atacar agresivamente los costos de la calidad. Los costos generales de la calidad usualmente, se dividen en tangibles e intangibles. La parte tangible o visible de los costos de calidad son, inspección, costos de garantía, desperdicios, retrabajo y rechazos, pueden ser aproximadamente 10-15% del costo total de calidad. El resto de los costos de calidad son usualmente intangibles, por lo que las empresas los pasan por alto en el análisis de los costos de calidad (Sokovic, Pavletic, & Krulcic, 2006).

El procedimiento de mejora Seis Sigma es visto como una contribución novedosa y efectiva a la gestión de la calidad (De Mast & Lokkerbol, 2012). En Seis Sigma todos los proyectos se desarrollan en forma rigurosa con la metodología de cinco fases DMAIC (por sus siglas en inglés): **definir, medir, analizar, mejorar y controlar** (Gutiérrez Pulido, 2010).

DMAIC difiere de otros programas de calidad que son verticales de arriba hacia abajo, en esta metodología rigurosa se exige un análisis detallado de las decisiones basadas en hechos. Es un método riguroso impulsado por datos para tratar con defectos, desperdicios y problemas de calidad, en fabricación, servicios y otras actividades empresariales. Este enfoque está demostrando ser una poderosa herramienta para resolver problemas complejos. Aun así, no funcionaría bien sin el compromiso total de la alta dirección (Sehgal & Kaushish, 2013).

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tener procesos en los que ocasionalmente sucedan errores puede que no parezca un gran problema. Pero cuando se tiene en cuenta cuántos errores pueden estar acechando los procesos corporativos, el impacto económico en la productividad total, la satisfacción al cliente y la rentabilidad se multiplican dramáticamente (Arias Montoya, Portilla, & Castaño Benjumea, 2008).

El enfoque Seis Sigma, a través de la metodología DMAIC se utiliza para eliminar los defectos en un proceso de una empresa automotriz. Esto ha ayudado a reducir defectos en el proceso y así mejorar la productividad y el tiempo de entrega al cliente.

En la fabricación de árboles de levas, por la cantidad de defectos presentados en el maquinado de la brida se pretende llevar un control estadístico de las unidades para reducir el defecto y el costo en que se incurre por ellos, la empresa menciona que un 15% de la producción presenta defectos.

El árbol de levas es un elemento que consiste en un eje giratorio que permite la apertura o cierre de las válvulas de admisión y de escape.

El árbol de levas es el encargado de abrir y cerrar las válvulas de forma que realice un giro completo cada dos vueltas del cigüeñal o ciclo completo de trabajo, para un motor de cuatro tiempos. Para obtener el resultado lleva unos salientes excéntricos llamados levas, son aquellos que se encargan de regular el ciclo y realizar el empuje necesario. Cada una de estas se encarga, de abrir una válvula y se encuentran desfasadas entre sí, siguiendo un determinado ciclo. El árbol de levas dispone tres o más puntos de apoyo dependiendo de su longitud, el propósito es la sujeción y evitar flexiones y vibraciones, así también como un plato de anclaje (brida) en uno de sus extremos para apoyar el piñón que es encargado de proporcionar el giro (García Guerrero, 2014).

El runout es una tolerancia sobresaliente usada para controlar la relación funcional de una o más características de una pieza, en este caso del eje de la brida, con respecto al eje de referencia (Briggs E., 2009).

Según el ingeniero de la empresa la brida es un acople del árbol de levas con la cabeza del motor la cual mantiene al árbol de levas en su posición y así evitar deslizamientos del eje del árbol.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Al realizar el maquinado del árbol de levas, la empresa busca hacerlo a la primera vez y con el menor costo posible, para esto se ha planteado el siguiente objetivo: Aplicar el método DMAIC para reducir el defecto de runout en cara de brida (trusth face) en el proceso de maquinado del árbol de levas.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer a fondo la implementación de la metodología DMAIC.
- Seleccionar o buscar una organización o empresa donde se pueda aplicar la metodología DMAIC.
- Identificar el proceso o producto clave.
- Aplicar la metodología DMAIC

## **1.4 HIPÓTESIS**

Para la empresa es fundamental entregar productos que cumplan con las especificaciones del cliente y así optimizar recursos y disminuir costos, por tal motivo se plantea lo siguiente:

El defecto de runout en la cara de la brida se reducirá a la mitad al implementar la metodología DMAIC en el maquinado del árbol de levas.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

Actualmente las empresas ya sean de manufactura o de servicios buscan la excelencia en la calidad para así atraer más clientes. En la empresa de maquinado del árbol de levas no es la excepción y a pesar de ser reconocida como una empresa de calidad sigue buscando la excelencia.

Por este motivo, una de sus metas es reducir el defecto de runout en la cara de la brida del árbol de levas, el cual es un mecanismo formado por un eje en el que se colocan distintas levas, que pueden tener distintas formas y tamaños y estar orientadas de diferente manera para activar diferentes mecanismos a intervalos repetitivos, figura 1.1, como por ejemplo las válvulas, es decir, constituye un temporizador mecánico cíclico (arboldelevas.blogspot.mx, 2011).

Un árbol de levas tiene por función abrir la válvula por medio de una "leva" y mantenerla así durante el tiempo necesario para que entre o salga la mezcla aire-gas al cilindro donde se realizará la combustión. Además, tiene como función secundaria hacer girar directamente la bomba de aceite (arboldelevas.blogspot.mx, 2011).

La denominación original de brida corresponde a las llamadas bridas planas, consistentes en una pletina en forma de disco o con orejetas, con dos o más agujeros, que se suelda o se atornilla en el extremo de los tubos o árboles y sirve para efectuar empalmes entre sí o uniones con otras piezas mecánicas. Otras veces la brida viene ya fundida en el mismo cuerpo de la pieza (MOTORGIGA, 2016).

Una brida con runout fuera de especificaciones ocasionará un mal funcionamiento en el giro del árbol de levas y por tal motivo, un mal funcionamiento en el trabajo del motor del vehículo y por ende es fundamental eliminar este defecto para obtener productos conformes y la satisfacción del cliente.

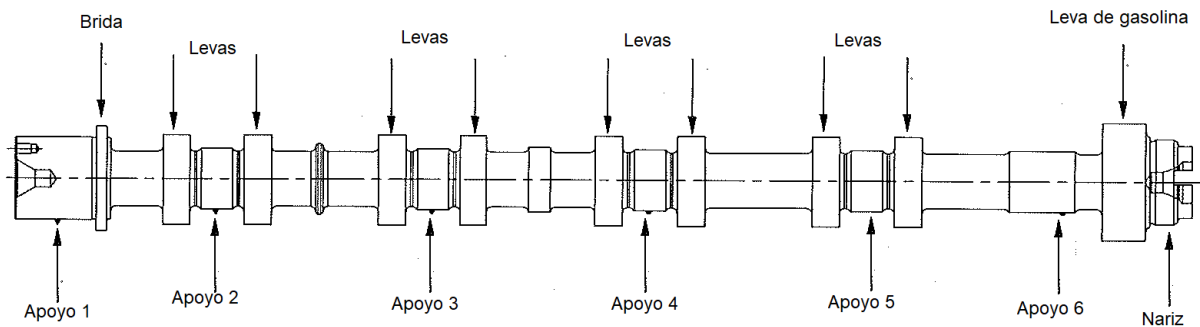


Figura 1.1 Árbol de levas. Fuente (arbomex.com.mx)

## 1.6 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

La meta de Seis Sigma, que le da su nombre, es lograr que los procesos tengan una calidad Seis Sigma. Cuantitativamente esto quiere decir tener 3.4 defectos por millón de oportunidades o en otras palabras, estar bien el 99.9997% de las veces a la primera. Culturalmente esto significa que se deben ejecutar los procesos claves casi a la perfección (Polesky, 2006). Esta meta se pretende alcanzar mediante un programa vigoroso de mejora, diseñado e impulsado por la alta dirección de una organización en el que se desarrollan proyectos Seis Sigma a lo largo y ancho con el objetivo de lograr mejoras mediante la eliminación de defectos, retrasos de productos, procesos y transacciones (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2009).

De lo anterior se derivan las siguientes cuestiones:

- ¿Con la aplicación sistemática de la metodología DMAIC será posible lograr que el proceso de maquinado del árbol de levas tenga calidad Seis Sigma?
- ¿La participación de la alta dirección será necesaria para el éxito de la implementación de la metodología DMAIC?

- ¿Se logrará reducir significativamente los defectos de runout en el proceso de maquinado del árbol de levas con la aplicación de la metodología DMAIC?

## **1.7 ALCANCE Y LIMITACIONES**

Una característica importante de la estructura de la metodología DMAIC es que estimula a pensar creativamente respecto de los problemas y las posibles soluciones dentro de la definición del proceso, o incluso del producto o servicio. Otro aspecto interesante de esta metodología es que el éxito obtenido proviene de la efectividad con que se utilice un conjunto relativamente pequeño de herramientas en las distintas fases de la metodología (Saglimbeni Jarrín, 2015).

La aplicación del método DMAIC sólo se hará al modelo de árbol de levas especificado por la empresa de entre todos los modelos existentes.

Se pretende con este proyecto reducir a la mitad el defecto de runout de la brida en el árbol de levas especificado por la empresa.

Las fases de la metodología DMAIC estarán limitadas por el tiempo con el que se cuenta para la elaboración de la tesis.

La toma de datos sólo se podrá realizar en los días y horarios en que sea elaborado el árbol de levas especificado.

Se espera que el enfoque DMAIC sea aceptado y asimilado por todos los niveles en la empresa para así lograr resultados que sean favorables para todas las partes.

## Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

La calidad es un objetivo fundamental en las operaciones y aun cuando la administración de la calidad es de carácter interfuncional e involucra a toda la organización, requiere la cooperación de todos y una cuidadosa atención de la gerencia y control de calidad.

En años recientes, ha habido un gran interés en la administración de la calidad, en USA es difícil tomar un periódico sin leer acerca del reconocimiento Baldrige, el ISO 9000, Seis Sigmas o algún enfoque utilizado por las compañías para mejorar su calidad (Schroeder, Goldstein, & Johnny, 2011).

La calidad de un proceso resulta crítica porque se relaciona directamente con la confiabilidad de un producto o servicio. Por ejemplo, al comprar una bicicleta no importa si es la primera bicicleta de un niño o la de un ciclista internacional, los clientes requieren productos sin defectos. Por tanto, la meta de la calidad de un proceso es producir bienes y servicios sin defectos. Las especificaciones de los productos y servicios, proporcionadas en índices de tolerancia de las dimensiones y/o errores en los servicios, definen como producir el bien o servicio. El cumplimiento de estas especificaciones es fundamental para garantizar la confiabilidad del producto o servicio conforme la define su uso (Robert & Chase, 2014).

La administración de la calidad ha tenido diversos significados a través de los años. A principios del siglo XX significaba inspección. En la década de 1940 adquirió una connotación estadística dado el comienzo del uso de métodos estadísticos para controlarla dentro de la variación natural de los procesos.

En la década de 1960 su significado se amplía para incluir a toda la organización así como a las funciones que contribuyen en el diseño y en la producción de calidad. La calidad era interpretada no sólo como un acto de producción sino como algo en lo que toda la organización se debería esforzar para dar al cliente (Schroeder, Goldstein, & Johnny, 2011).



En la actualidad, la calidad está asumiendo un significado más amplio, incluyendo un mejoramiento continuo, una ventaja competitiva y un enfoque centrado en el consumidor. (Schroeder, Goldstein, & Johnny, 2011)

Los líderes filosóficos del movimiento de calidad, sobre todo Philip Crosby, W, Edwards Deming y Joseph M. Duran, los llamados gurús de la calidad definieron la calidad de manera un poco diferente (Tabla 2.1), aunque todos transmiten el mismo mensaje.

Tabla 2.1 Comparación de los gurús de calidad. Fuente (*Robert & Chase, 2014*).

|                       | <b>Crosby</b>                  | <b>Deming</b>                                                                              | <b>Juran</b>                                             |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Definición de calidad | Conformidad con los requisitos | Grado predecible de uniformidad y dependencia con costos bajos y adecuados para el mercado | Idoneidad de uso (satisface las necesidades del cliente) |

De los diversos enfoques que existen para el mejoramiento y control de la calidad Seis Sigma está ganando rápidamente aceptación en las industrias de manufactura y de servicios como un enfoque probado para el uso de las siete herramientas del control de la calidad (Tabla 2.2); aunque no existe una encuesta confiable acerca de la adopción de Seis Sigma, la lista de organizaciones que han reportado la implementación de Seis Sigma continua en aumento. (Schroeder, Goldstein, & Johnny, 2011)

Tabla 2.2 Las Siete herramientas de control de la calidad. Fuente (*Schroeder, Goldstein, & Johnny, 2011*).

| <b>Herramienta</b>          | <b>Propósito</b>                                                   |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Diagramas de flujo          | Entender el proceso e identificar las posibles áreas problemáticas |
| Hojas de verificación       | Tabular los datos sobre un área problemática                       |
| Histogramas                 | Ilustrar la frecuencia de ocurrencia de las medidas                |
| Diagramas de Pareto         | Identificar los problemas más importantes                          |
| Diagramas de causa y efecto | Mostrar las posibles causas del problema                           |

|                         |                                                                  |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Diagramas de dispersión | Investigar las causas y los efectos                              |
| Gráficas de control     | Mantener las ganancias provenientes del mejoramiento del proceso |

## 2.1 SEIS SIGMA

Sigma ( $\sigma$ ) es una letra en el alfabeto griego que se ha convertido en el símbolo estadístico y la métrica de la variación del proceso. La escala sigma de medida está perfectamente correlacionada con características tales como defectos por unidad, partes por millón defectuosos y la probabilidad de un fallo. (Park, 2003)

Seis Sigma se puede definir de varias maneras. Tomkins (1997) define Seis Sigma como "un programa dirigido a la casi eliminación de defectos de cada producto, proceso y transacción". Harry (1998) define Seis Sigma como "una iniciativa estratégica para aumentar la rentabilidad, aumentar la cuota de mercado y Mejorar la satisfacción del cliente a través de herramientas estadísticas que pueden conducir a avances cuánticos en la calidad". Seis Sigma fue lanzado por Motorola en 1987 (Park, 2003).

Seis Sigma requiere de herramientas y metodologías estadísticas para eliminar la variabilidad de los procesos y producir resultados esperados, con un mínimo de defectos, costos bajos y la satisfacción del cliente y esto contrasta con la manera tradicional de asegurar la calidad, al inspeccionar post-mortem y tratar de corregir los defectos una vez producidos. Seis Sigma minimiza los defectos hasta un punto de 3.4 errores por cada millón de oportunidades, esto es tener una calidad de 99.9997% (Seis-Sigma.com, 2002).

Un beneficio de Seis Sigma es que los gerentes describen con facilidad el desempeño de un proceso en términos de variabilidad y comparan varios procesos usando una medida común. Esta medida es defectos por millón de oportunidades (DPMO). El cálculo requiere tres datos:

Unidad. El artículo producido o el servicio prestado.

Defecto. Cualquier artículo o suceso que no cumpla con los requisitos del cliente.

Oportunidad. Posibilidad de que ocurra un defecto.

El cálculo sencillo se obtiene con la siguiente fórmula:

$$DPMO = \frac{\text{cantidad de defectos}}{\text{cantidad de oportunidades de error por unidad} \times \text{número de unidades}} \times 1000000$$

(Robert & Chase, 2014)

El enfoque Seis Sigma se centra en reducir a 3.4 defectos por millón de oportunidades y reducir los costos de los artículos no conformes, en la tabla 2.3 se muestra la capacidad del proceso Seis Sigma.

Tabla 2.3 Capacidad del proceso Seis Sigma. Fuente (Lucas, 2002).

| <b>Sigma</b> | <b>Defectos por millón</b> | <b>Costo de la mala calidad</b> | <b>Tipo de industria</b> |
|--------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1            | 700,000                    | > 40% de ventas                 |                          |
| 2            | 310,000                    | 30 a 40% de ventas              | No competitiva           |
| 3            | 67,000                     | 20 a 30% de ventas              |                          |
| 4            | 6,200                      | 15 a 20% de ventas              | Promedio Industrial      |
| 5            | 230                        | 10 a 15% de ventas              |                          |
| 6            | 3.4                        | < 10% de ventas                 | De clase mundial         |

El método Seis Sigma nos permite trazar comparaciones entre todos los procesos, y nos indica cuán bueno es un proceso. A través de esta información, la gerencia de nivel superior aprende qué camino seguir para lograr la innovación de procesos y la satisfacción del cliente. En segundo lugar, Seis Sigma proporciona el cultivo eficiente de la mano de obra y la utilización. Emplea un "sistema de cinturón" en el que los niveles de maestría se clasifican como cinturón verde, cinturón negro, cinturón negro maestro y campeón. En tercer lugar, hay muchas historias de éxito de la aplicación Seis Sigma en empresas de clase mundial. Por último, Seis Sigma ofrece flexibilidad en el nuevo milenio de las 3Cs, que son:

- Cambio: la sociedad cambiante.

- Cliente: El poder se traslada al cliente y la demanda de los clientes es alta.
- Competencia: Competencia en calidad y productividad.

Más notablemente, el poder ha cambiado de productor a cliente. La sociedad industrial orientada al productor ha terminado y la sociedad de la información orientada al cliente ha llegado. El cliente tiene todos los derechos para ordenar, seleccionar y comprar bienes y servicios. Especialmente, en el negocio electrónico, el cliente tiene todo poderoso poder. La competencia en calidad y productividad ha ido en aumento. Los bienes de segunda calidad no pueden sobrevivir más en el mercado. Seis Sigma con sus enfoques 4S (sistemático, científico, estadístico e inteligente) brinda flexibilidad en la gestión de una unidad de negocio (Park, 2003).

El objetivo principal de Seis Sigma es mejorar el rendimiento de los procesos. Al mejorar los procesos, intenta lograr tres cosas: la primera es reducir los costos, la segunda es mejorar la satisfacción del cliente, y la tercera es aumentar los ingresos, por lo tanto, aumentar los beneficios (Park, 2003).

## **2.2 MÉTRICAS DE SEIS SIGMA**

Las técnicas para evaluar la capacidad de procesos teniendo en cuenta los defectos están compuestas por las métricas Seis Sigma las cuales son defectos por unidad (DPU), defectos por oportunidades (DPO), Defectos por millón de unidades (DPMU), Defectos por millón de oportunidades (DPMO), rendimiento del proceso (Yield) y el Nivel sigma del proceso (Z). Todas estas métricas tienen en común que salen a partir de los defectos que se evidencian en las características de calidad (Pérez Urrego, Peláez Zuñiga, & Carrión García, 2013).

### **2.2.1 MÉTRICAS PARA ATRIBUTOS**

Las métricas de Seis Sigma que emplean a los defectos del proceso para obtener indicadores que miden la calidad de un proceso y tienen un fácil cálculo se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Métricas Seis Sigma (Pérez Urrego, Peláez Zuñiga, & Carrión García, 2013).

| Métrica                                     | Ecuación                        | Descripción                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Defectos por unidad (DPU)                   | $DPU = \frac{D}{N}$             | Permite saber cuál es el promedio de defectos por unidad de producción.                                                                               |
| Defectos por oportunidad (DPO)              | $DPO = \frac{D}{N * O}$         | Toma el número de defectos que se obtienen del proceso, sobre las oportunidades que son propensas de fallar durante el proceso de producción.         |
| Defectos por millón de oportunidades (DPMO) | $DPMO = \frac{D}{N * O} * 10^6$ | Esta métrica es un complemento de la DPO en el caso de que la unidad tenga una sola oportunidad. Se obtiene al multiplicar la anterior por un millón. |
| Defectos por millón de unidades (DPMU)      | $DPMU = \frac{D}{N} * 10^6$     | Se obtiene al multiplicar a DPU por un millón, se utiliza cuando un producto solamente tiene una característica de calidad.                           |

Donde:

D = número de defectos

N = número de unidades producidas

O = oportunidades de presentar defectos en la unidad

## 2.2.2 MÉTRICAS PARA RENDIMIENTO

Las métricas de Seis Sigma que miden el rendimiento de un proceso se basan en los productos que están libres de defectos, estas métricas se representan en términos porcentuales o fracción conforme del proceso. En la tabla 2.5 se enlistan las métricas de rendimiento.

Tabla 2.5 Métricas de rendimiento. Fuente (Pérez Urrego, Peláez Zuñiga, & Carrión García, 2013).

| Métrica                     | Ecuación                                     | Descripción                                                                     |
|-----------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Rendimiento tradicional (Y) | $Y = \frac{out}{in} = \frac{in - scrap}{in}$ | Es una perspectiva engañosa que oculta el impacto de la inspección y retrabajo. |

|                                        |                                        |                                                                                                                                                |
|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rendimiento a la primera vez (FTY)     | $FTY = \frac{in - scrap - rework}{in}$ | Muestra la probabilidad de que un elemento pasa a través de un proceso con éxito la primera vez.                                               |
| Continuidad de salida sin fallos (RTY) | $RTY = \prod_{i=1}^n FTY_i$            | Indica la probabilidad de que un elemento pasa a través de todos los pasos del proceso con éxito la primera vez (rendimiento combinado total). |
| Rendimiento normalizado (NRTY)         | $NRTY = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n FTY_i}$ | Es la probabilidad promedio por cada paso de todo el proceso para producir cero productos defectuosos.                                         |

Donde:

Out = salidas

In = entradas

Scrap = defectos

Rework = retrabajo

### 2.2.3 MÉTRICAS PARA EL NIVEL SIGMA

El nivel Sigma de un proceso se define como una medida de defectos en el proceso. A mayor nivel Sigma indica que en el proceso resultan menos defectos mientras que en un nivel Sigma menor significa una mayor tasa de defectos. El nivel Sigma de calidad puede utilizarse para medir y comparar la calidad del proceso (Kumar, Crocker, Chitra, & Saranga, 2006).

Según Correa, el parámetro Sigma es un parámetro universal y se basa en la probabilidad de ocurrencia de los defectos; viene a reemplazar a los índices de capacidad actuales de los procesos de producción Cp y Cpk (Correa, 2003).

### 2.2.3.1 ÍNDICE Z

El índice Z para medir la capacidad del proceso consiste en calcular la distancia entre las especificaciones y la media ( $\mu$ ) del proceso en unidades de la desviación estándar ( $\sigma$ ). De esta manera, para un proceso con doble especificación se tiene Z superior ( $Z_s$ ) y Z inferior ( $Z_i$ ) que se definen así:

$$Z_s = \frac{ES - \mu}{\sigma} \quad y \quad Z_i = \frac{\mu - EI}{\sigma}$$

Donde:

ES = especificación superior

EI = especificación inferior

La capacidad del proceso medida en términos de Z es igual al valor más pequeño de entre  $Z_s$  y  $Z_i$ , es decir:  $Z = \min[Z_s, Z_i]$ . Ésta es la métrica más usada en Seis Sigma (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma, 2009).

### 2.2.3.2 ÍNDICE PPM

El índice de PPM se aplica cuando la parte cumple o no cumple (pasa o no pasa) y aquí se aplica una distribución binomial y su aproximación a la normal, en general si se conocen las partes por millón fuera de especificaciones de largo plazo ( $PPM_L$ ), entonces el nivel de calidad en sigmas se obtiene con la ecuación de Schmidt y Launsby:

$$\text{Nivel de calidad en sigmas}(Z_c) = 0.8406 + \sqrt{29.37 - 2.221 * \ln(PPM)}$$

Y de igual manera si se conoce el nivel sigma del proceso es posible obtener las PPM que se esperan a largo plazo:

$$PPM_L = \exp \left[ \frac{29.37 - (Z_c - 0.8406)^2}{2.221} \right]$$

Los niveles de calidad medidos en sigmas no sólo son números enteros, sino que pueden ser números reales con decimales. Además, pasar de un nivel de calidad sigma al siguiente superior no es una tarea sencilla (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma, 2009).

### 2.2.3.3 ÍNDICE DPMO

Los defectos por millón de oportunidades se refieren a variables para atributos más cercanas a variables con distribución Poisson donde una pieza puede tener más de un defecto y no necesariamente rechazarse.

Para calcular el nivel sigma,  $Z_c$ , se realiza el siguiente algoritmo para calcular el rendimiento del proceso ( $Y$ ):

$$DPO = \frac{DPMO}{10^6} \rightarrow DPU = DPO * O \rightarrow Y = e^{-DPU}$$

Después de obtener el rendimiento ( $Y$ ), es decir, la probabilidad de que una unidad esté libre de defectos, es preciso encontrar el valor de  $Z$  en una tabla de distribución normal estándar que da una probabilidad acumulada igual a  $Y$ , es decir, el nivel de Sigma de largo plazo para el proceso =  $Z_Y$ , donde:

$$P(Z > Z_Y) = 1 - Y$$

Por último para determinar el nivel Sigma del proceso se utiliza la expresión:  $Z_c = Z_Y + 1.5$  (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma, 2009).

## 2.3 METODOLOGÍA DMAIC

Los datos obtenidos de cualquier proceso no resuelven por si solos los problemas del mismo, para poder identificar las variables críticas de la calidad (VCC) y los procesos o áreas a mejorar es necesario tener una metodología robusta.



En Seis Sigma todos los proyectos se desarrollan en forma rigurosa con la metodología de cinco fases: definir, medir, analizar, mejorar y controlar (DMAIC por sus siglas en inglés), en la figura 2.1 se muestran las fases (Gutiérrez Pulido, 2010).

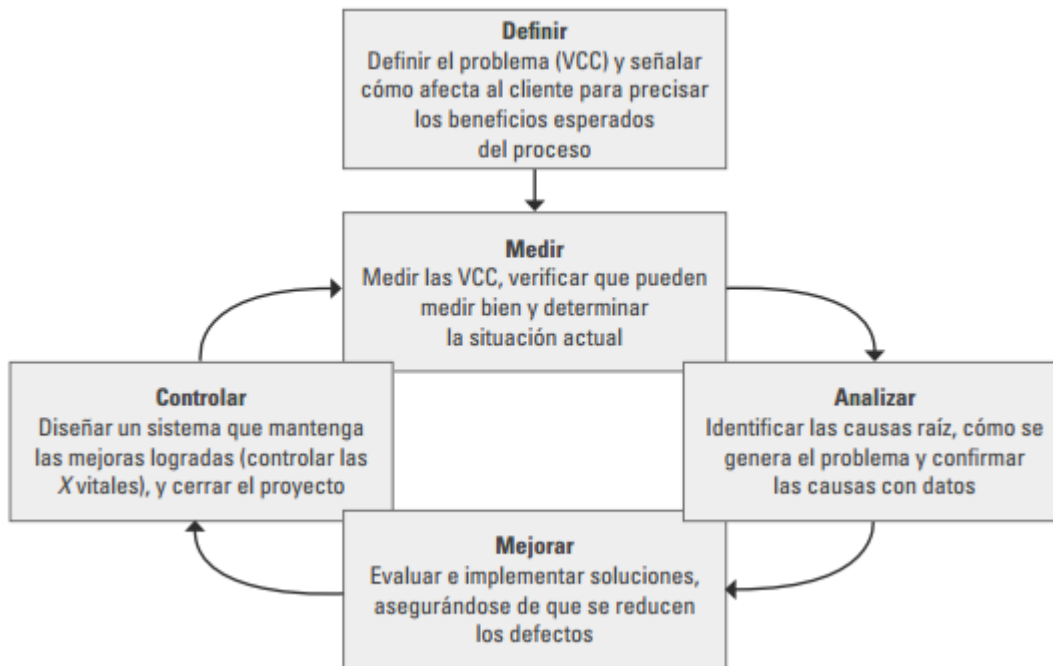


Figura 2.1 Metodología DMAIC. Fuente (Gutiérrez Pulido, 2010)

### **Definir (Define)**

En esta fase se delimitan y se sientan las bases para su éxito. Por ello, al finalizar esta fase se debe tener claro el objetivo del proyecto, la forma de medir su éxito, su alcance, los beneficios potenciales y las personas que intervienen en el proyecto. Todo esto se debe resumir en el marco del proyecto.

### **Medir (Measure)**

El objetivo general de esta fase es entender y cuantificar la magnitud del problema, para esto se define el proceso a un nivel más detallado, se establecen con mayor detalle las métricas (las Y's) con las que se evaluará el éxito del proyecto y se analiza y valida el sistema de medición para garantizar que las métricas se midan en forma

consistente. Con el sistema de medición validado se mide la situación actual para clarificar el punto de arranque del proyecto respecto a las Y's.

Para lograr esto se utilizan herramientas básicas como son: mapeo de procesos, estudios de repetibilidad y reproducibilidad, técnicas estadísticas, capacidad del proceso, AMEF y métricas Seis Sigma.

### **Analizar (Analyze)**

La meta de esta fase es identificar las causas raíz del problema (las x's), entender como estas generan el problema y confirmar las causas con datos.

Las herramientas más utilizadas son: lluvia de ideas, diagrama de Ishikawa, Pareto de segundo nivel, estratificación, cartas de control, mapeo de procesos, los cinco porqués, despliegue de la función de calidad para relacionar variables de entrada con variables de salida, diseño de experimentos, prueba de hipótesis, diagrama de dispersión, etc.

### **Mejorar (Improve)**

El objetivo de esta etapa es proponer e implementar soluciones que atiendan las causas raíz y asegurarse de que se corrija o reduzca el problema. Es recomendable generar diferentes alternativas de solución que atiendan las diversas causas, apoyándose en 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 la fuente del problema (causas) y no el efecto.

### **Controlar (Control)**

Una vez que se alcanzaron las mejoras deseadas, en esta etapa se diseña un sistema que mantenga las mejoras logradas (controlar las X vitales) y se cierra el proyecto. El reto de la etapa de control es que las mejoras soporten la prueba del tiempo. En este sentido, es necesario establecer un sistema de control para prevenir que los problemas que tenía el proceso no se vuelvan a repetir (mantener las ganancias); impedir que las mejoras y conocimiento obtenidos se olviden; mantener el desempeño del proceso, y alentar la mejora continua (Gutiérrez Pulido, 2010).

## 2.4 ESTADO DEL ARTE

Arum Vijay S e Iman Abdulrahman (2014) aplicaron la metodología Seis Sigma para reducir el tiempo de ciclo del proceso de alta hospitalaria del paciente en un entorno hospitalario multidisciplinario en la India. Este estudio sugirió varias estrategias de mejora para reducir el tiempo de ciclo y después de su implementación, hay una reducción del 61% en el tiempo de ciclo de alta del paciente.

En la fábrica Nacional de Licores (FANAL) se propuso la mejora de la eficiencia en la línea de envasado de pet empleando la metodología DMAIC-Seis Sigma por Esteban Pérez López y Minor García Cerdas (2014). Al aplicar los pasos detectaron que la línea tenía tiempos efectivos de producción muy bajos, exceso de paros, etc. Se midió la eficiencia global de los equipos (OEE) y obtuvieron 47% y después de aplicar la metodología DMAIC e implementar las mejoras propuestas lograron pasar a un OEE de 80%.

K. Srinivasan et al (2016) demostraron que las fases de la metodología DMAIC son suficientemente poderosas para obtener mejoras sin la necesidad de la capacitación basada en cinturones, la cual es muy costosa. Implementaron la metodología en una empresa de fabricación de hornos y como resultado de esto el nivel sigma aumento de 3.31 a 3.67 y con esto demostraron que las empresas con menos ingresos pueden obtener un nivel sigma de calidad y adquieran fortaleza competitiva.

# Capítulo 3 METODOLOGÍA

## 3.1 MÉTODO

La realización del proyecto se llevó a cabo aplicando Seis Sigma siguiendo la metodología DMAIC, la cual cuenta con varias etapas perfectamente definidas, como se muestran en la figura 3.1.

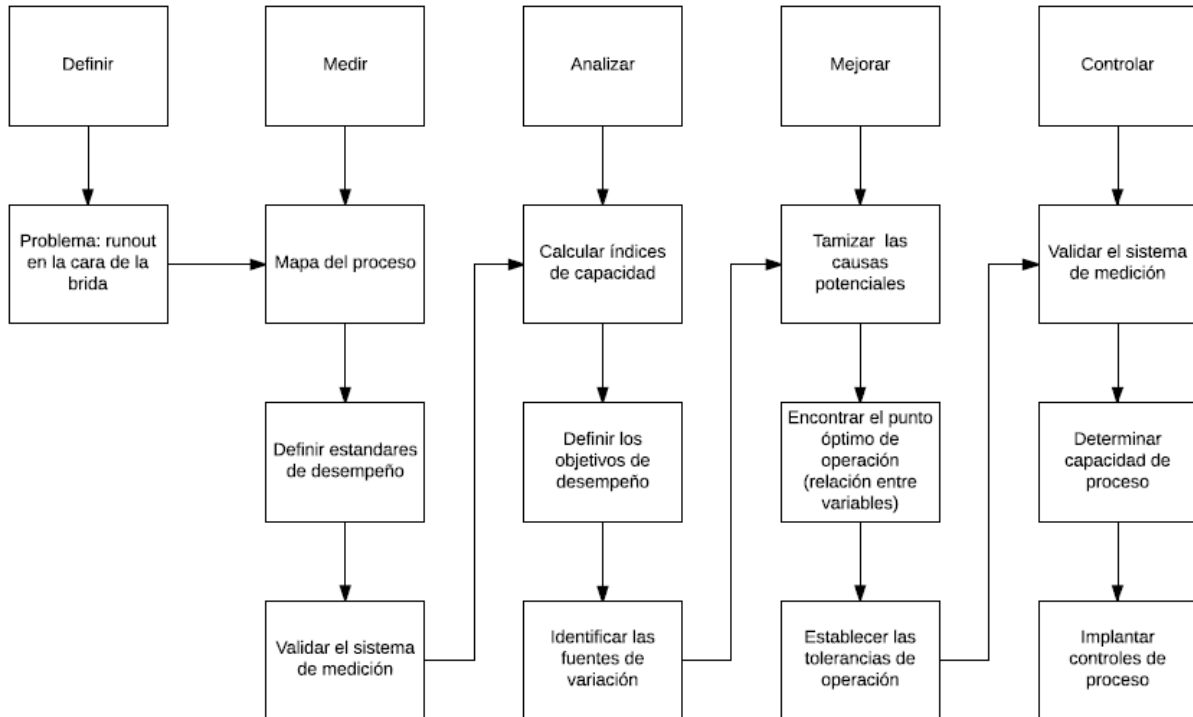


Figura 3.1 Diagrama de flujo del método

## 3.2 FASE DE DEFINICIÓN

### 3.2.1 SELECCIÓN DE CTQ

La selección de las variables críticas de calidad se realizó en una reunión con personal de la empresa (jefe de área, supervisores, calidad), en la cual se hizo una lluvia de ideas para determinar los principales problemas de calidad, entre los cuales fueron el alto índice de retrabajo y scrap de algunas de las piezas que ellos maquinan. Después de una ardua discusión de los problemas se llegó a la selección de la pieza Mx-618, que tiene un alto índice de defectos por su problema de runout en la cara de la brida.

### 3.3 FASE DE MEDICIÓN

En esta fase se llevó a cabo un estudio del proceso identificando todas las operaciones necesarias para maquinar la pieza Mx-618, por lo que se realizó un mapeo de proceso de la línea de producción, para identificar las operaciones que afectan el desempeño de la brida. Se establecieron los estándares de desempeño de la brida y se validó el sistema de medición.

En todos los procesos de manufactura es fundamental obtener mediciones lo más cercanas a la realidad de la parte a medir, para tener la certeza que las mediciones son correctas es primordial verificar el sistema de medición ya que los errores en las medidas pueden causar tomar decisiones incorrectas y tener un análisis estadístico erróneo y una mala interpretación. Un buen sistema de medición debe cumplir con varios aspectos, debe ser preciso, es decir, debe ser muy cercano al valor real; también debe ser repetible, lo que significa que si se mide varias veces el mismo objeto los resultados deben ser “similares” entre sí; debe ser reproducible, o sea, se deben obtener los mismos resultados cuando el sistema de medición es utilizado por diferentes personas (debidamente capacitadas); el sistema debe ser estable, por lo que debe producir los mismos resultados al medir un mismo objeto ya sea ayer, hoy o mañana, y por último el sistema debe ser lineal, que la diferencia de los valores estén en el rango de operación del aparato medidor (Pyzdek & Keller, 2014).

Por lo tanto la verificación es muy importante ya que todas las mediciones pueden tener un sesgo o un error, al cuantificar estos errores se determina si el sistema de medición es apropiado o no.

Para cuantificar la variación del sistema de medición que contribuye a la variación total se utiliza el coeficiente GRR obtenido del análisis Gage R & R, que es el método estándar para validar cualquier sistema de medición y se basa en los medidores de repetibilidad y reproducibilidad:

$$GRR = \frac{\sigma_m}{\sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_p^2}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_t}$$

donde GRR es la proporción de la variación de la medida relativa a la variación total,  $\sigma_m^2$  es la varianza de la medida de errores,  $\sigma_p^2$  es la varianza del proceso y  $\sigma_t^2$  es la varianza total. En la tabla 3.1 se muestran los valores de corte del índice GRR para determinar si el sistema de medición es aceptable (Automotive Industry Action Group, 2010).

Tabla 3.1 Valores de corte para los sistemas de medición. Fuente (Automotive Industry Action Group, 2010).

|     | Sistema de medición |                                     |              |
|-----|---------------------|-------------------------------------|--------------|
|     | Aceptable           | Aceptable para algunas aplicaciones | No aceptable |
| GRR | < 10%               | Entre 10% y 30%                     | > 30%        |

La situación que se presenta en el proceso de maquinado del árbol de levas de la pieza MX-618 es que en la misma línea de producción se maquilan otros tipos de árboles y por consiguiente no es nada fácil disponer de las máquinas para realizar las mediciones y por lo tanto, no es posible realizar un Gage R & R sin afectar el proceso de producción.

La alternativa para validar el sistema de medición es el método por apalancamiento, que es seleccionar piezas con valores medidos inicialmente con valores extremos a la media (Browne, Mackay, & Steiner, 2007). Esta alternativa evalúa el sistema utilizando el coeficiente de correlación intraclase ( $\rho$ ) el cual se obtiene con:

$$\rho = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_m^2 + \sigma_p^2} = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_t^2}$$

el cual se relaciona con el índice GRR por la expresión  $\rho = 1 - GRR^2$  (Browne, Mackay, & Stefan, Business and Industrial Statistics Research Group, 2007) con lo cual se obtienen los valores de corte del coeficiente de correlación intraclase que se muestran en la tabla 3.2 para determinar si el sistema de medición es aceptable.

Tabla 3.2 Valores de corte de los sistemas de medición en función de  $\rho$ .

|        | Sistema de medición |                                     |              |
|--------|---------------------|-------------------------------------|--------------|
|        | Aceptable           | Aceptable para algunas aplicaciones | No aceptable |
| $\rho$ | > 0.99              | Entre 0.99 y 0.91                   | < 0.91       |

El método por apalancamiento consta de dos fases las cuales son:

Fase 1. Se obtiene una muestra aleatoria  $b$  de la línea base de producción y se anotan los valores de las mediciones  $\{Y_{10}, Y_{20}, \dots, Y_{b0}\}$ .

Fase 2. De la muestra de  $b$  piezas se seleccionan  $k$  piezas (subgrupo  $S$ ) cuyos valores de medición estén alejados de la media de  $b$ . Las  $k$  piezas se miden repetidamente  $n$  veces para obtener datos adicionales  $\{y_{ij}, i \in S \text{ y } j = 1, \dots, n\}$ . El total de mediciones en el apalancamiento es  $N = b + nk$ .

Según Browne, Mackay y Steiner (2007) los valores de  $b = 30$ ,  $k = 5$  y  $n = 6$  son muy buenos para realizar la estimación de  $\rho$  con resultados precisos.

Para obtener el valor de  $\rho$  se utiliza la estimación de  $\mu$  y  $\sigma^2$  de la información de las piezas de la muestra  $b$  de la línea base de producción y la variación dentro de las mediciones repetidas de las  $k$  piezas (la variación dentro de las mediciones repetidas es independiente del valor inicial  $Y_{i0}$ ).

Se utiliza el estimador ANOVA MSW el cual se obtiene con:

$$MSW = \frac{\sum_{i \in S} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{k}$$

donde MSW es un estimador de  $\sigma_m^2$ . La variación de la línea base de producción es una estimación de  $\sigma_p^2$  y  $\rho = \sigma_p^2 / (\sigma_p^2 + \sigma_m^2)$ , reordenando se obtiene el estimador de  $\rho$ :

$$\hat{\rho}_a = 1 - \frac{MSW}{\hat{\sigma}_t^2}$$

### 3.4 FASE DE ANÁLISIS

En esta fase se revisaron los datos obtenidos en cada una de las operaciones de la 20 a la 80 y determinar qué operación u operaciones son las críticas en el runout de la brida, se midió el runout a la salida de cada operación, las mediciones se muestran en la figura 3.2.

| OPERACIÓN 20 |            | OPERACIÓN 30 |            | OPERACION 50 |            | OPERACION 60 |            | OPERACIÓN 65 |            | OPERACION 70 |            | OPERACIÓN 80 |            |
|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| C. INT/DER   | C. EXT/IZQ | C. INT/DER   | C. EXT/IZQ | C. INT/DER   | C. EXT/IZQ | C. INT/DER   | C. EXT/IZQ | C. INT/DER   | C. EXT/IZQ | C. INT/DER   | C. EXT/IZQ | C. INT/DER   | C. EXT/IZQ |
| 0.01         | 0.009      | 0.013        | 0.009      | 0.013        | 0.007      | 0.014        | 0.008      | 0.014        | 0.008      | 0.011        | 0.013      | 0.01         | 0.008      |
| 0.009        | 0.006      | 0.01         | 0.006      | 0.011        | 0.008      | 0.006        | 0.006      | 0.007        | 0.004      | 0.006        | 0.006      | 0.006        | 0.006      |
| 0.007        | 0.005      | 0.008        | 0.005      | 0.007        | 0.007      | 0.006        | 0.012      | 0.009        | 0.01       | 0.008        | 0.006      | 0.007        | 0.011      |
| 0.016        | 0.01       | 0.014        | 0.01       | 0.015        | 0.011      | 0.012        | 0.015      | 0.016        | 0.015      | 0.019        | 0.017      | 0.017        | 0.02       |
| 0.018        | 0.01       | 0.015        | 0.009      | 0.017        | 0.012      | 0.011        | 0.009      | 0.013        | 0.007      | 0.007        | 0.007      | 0.01         | 0.008      |
| 0.012        | 0.009      | 0.012        | 0.01       | 0.014        | 0.01       | 0.015        | 0.013      | 0.012        | 0.012      | 0.013        | 0.011      | 0.015        | 0.015      |
| 0.013        | 0.013      | 0.013        | 0.01       | 0.02         | 0.014      | 0.019        | 0.022      | 0.02         | 0.021      | 0.018        | 0.017      | 0.022        | 0.023      |
| 0.007        | 0.005      | 0.008        | 0.006      | 0.007        | 0.005      | 0.003        | 0.004      | 0.004        | 0.003      | 0.004        | 0.005      | 0.005        | 0.004      |
| 0.012        | 0.01       | 0.012        | 0.009      | 0.017        | 0.006      | 0.009        | 0.013      | 0.015        | 0.01       | 0.015        | 0.015      | 0.008        | 0.018      |
| 0.009        | 0.007      | 0.005        | 0.005      | 0.012        | 0.007      | 0.003        | 0.005      | 0.004        | 0.008      | 0.005        | 0.003      | 0.006        | 0.005      |
| 0.01         | 0.007      | 0.01         | 0.004      | 0.009        | 0.003      | 0.004        | 0.008      | 0.008        | 0.008      | 0.009        | 0.01       | 0.009        | 0.007      |
| 0.01         | 0.005      | 0.014        | 0.009      | 0.014        | 0.009      | 0.01         | 0.01       | 0.014        | 0.009      | 0.013        | 0.015      | 0.014        | 0.011      |
| 0.015        | 0.015      | 0.013        | 0.015      | 0.013        | 0.018      | 0.022        | 0.025      | 0.021        | 0.024      | 0.025        | 0.024      | 0.024        | 0.033      |
| 0.009        | 0.006      | 0.009        | 0.005      | 0.006        | 0.006      | 0.006        | 0.01       | 0.012        | 0.011      | 0.013        | 0.01       | 0.012        | 0.011      |
| 0.01         | 0.013      | 0.009        | 0.009      | 0.005        | 0.008      | 0.011        | 0.016      | 0.01         | 0.015      | 0.014        | 0.013      | 0.009        | 0.018      |
| 0.005        | 0.005      | 0.003        | 0.003      | 0.005        | 0.005      | 0.002        | 0.012      | 0.004        | 0.012      | 0.01         | 0.005      | 0.006        | 0.01       |
| 0.007        | 0.005      | 0.005        | 0.003      | 0.005        | 0.006      | 0.006        | 0.01       | 0.008        | 0.01       | 0.01         | 0.006      | 0.007        | 0.013      |
| 0.005        | 0.004      | 0.005        | 0.005      | 0.008        | 0.005      | 0.004        | 0.005      | 0.003        | 0.006      | 0.004        | 0.003      | 0.006        | 0.003      |
| 0.008        | 0.008      | 0.011        | 0.01       | 0.008        | 0.008      | 0.01         | 0.015      | 0.011        | 0.015      | 0.015        | 0.014      | 0.019        | 0.019      |
| 0.006        | 0.005      | 0.006        | 0.005      | 0.004        | 0.007      | 0.003        | 0.007      | 0.002        | 0.007      | 0.005        | 0.004      | 0.005        | 0.006      |

Figura 3.2 Datos de las mediciones

#### 3.4.1 ESTUDIO DE CAPACIDAD DE PROCESO

Con los datos de 110 árboles de levas se procedió a realizar el estudio de capacidad del proceso, las mediciones del runout de las caras interna y externa se muestran en la tabla 3.3. Primeramente identificamos el tipo de distribución de los datos, esto se realizó en el software Minitab 17, las mediciones se muestran en la figura 3.5.

Tabla 3.3 Datos históricos del runout de 110 árboles de levas en mm.

|          | Cara Ext | Cara Int |           | Cara Ext | Cara Int |           | Cara Ext | Cara Int |           | Cara Ext | Cara Int |
|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| <b>1</b> | 0.0161   | 0.0188   | <b>29</b> | 0.00878  | 0.03199  | <b>57</b> | 0.0104   | 0.0102   | <b>85</b> | 0.01511  | 0.02455  |
| <b>2</b> | 0.0127   | 0.0143   | <b>30</b> | 0.0158   | 0.0164   | <b>58</b> | 0.0168   | 0.0165   | <b>86</b> | 0.01732  | 0.01812  |
| <b>3</b> | 0.0168   | 0.0151   | <b>31</b> | 0.02531  | 0.03368  | <b>59</b> | 0.0105   | 0.0102   | <b>87</b> | 0.01571  | 0.01481  |
| <b>4</b> | 0.0214   | 0.0213   | <b>32</b> | 0.0192   | 0.0198   | <b>60</b> | 0.0183   | 0.01798  | <b>88</b> | 0.01577  | 0.01723  |
| <b>5</b> | 0.0176   | 0.0231   | <b>33</b> | 0.0237   | 0.022    | <b>61</b> | 0.01097  | 0.01039  | <b>89</b> | 0.00749  | 0.00894  |
| <b>6</b> | 0.0121   | 0.0112   | <b>34</b> | 0.0074   | 0.0115   | <b>62</b> | 0.01069  | 0.00991  | <b>90</b> | 0.01688  | 0.02038  |
| <b>7</b> | 0.0167   | 0.0146   | <b>35</b> | 0.02717  | 0.02772  | <b>63</b> | 0.02244  | 0.02297  | <b>91</b> | 0.01194  | 0.01453  |



|    |         |         |    |         |         |    |         |         |     |         |         |
|----|---------|---------|----|---------|---------|----|---------|---------|-----|---------|---------|
| 8  | 0.0142  | 0.0127  | 36 | 0.01605 | 0.01495 | 64 | 0.01283 | 0.01164 | 92  | 0.0281  | 0.02413 |
| 9  | 0.0234  | 0.0262  | 37 | 0.01179 | 0.02395 | 65 | 0.0146  | 0.01721 | 93  | 0.01885 | 0.01516 |
| 10 | 0.0127  | 0.0128  | 38 | 0.02082 | 0.02124 | 66 | 0.00911 | 0.01863 | 94  | 0.01682 | 0.0165  |
| 11 | 0.0146  | 0.0148  | 39 | 0.009   | 0.0113  | 67 | 0.02448 | 0.02426 | 95  | 0.03618 | 0.42114 |
| 12 | 0.01375 | 0.01048 | 40 | 0.0137  | 0.0135  | 68 | 0.02213 | 0.02463 | 96  | 0.01894 | 0.01672 |
| 13 | 0.01234 | 0.03656 | 41 | 0.02062 | 0.00454 | 69 | 0.02149 | 0.02053 | 97  | 0.033   | 0.04178 |
| 14 | 0.01251 | 0.02855 | 42 | 0.01644 | 0.01109 | 70 | 0.0199  | 0.01652 | 98  | 0.00921 | 0.00667 |
| 15 | 0.0126  | 0.04154 | 43 | 0.03838 | 0.03807 | 71 | 0.00889 | 0.00843 | 99  | 0.0133  | 0.01311 |
| 16 | 0.02194 | 0.02752 | 44 | 0.01277 | 0.01519 | 72 | 0.00724 | 0.00524 | 100 | 0.01376 | 0.01169 |
| 17 | 0.0177  | 0.0174  | 45 | 0.01906 | 0.02693 | 73 | 0.00802 | 0.01388 | 101 | 0.01174 | 0.00919 |
| 18 | 0.01277 | 0.01017 | 46 | 0.01844 | 0.01948 | 74 | 0.0096  | 0.00781 | 102 | 0.03075 | 0.02814 |
| 19 | 0.01204 | 0.01005 | 47 | 0.03136 | 0.03218 | 75 | 0.02798 | 0.02971 | 103 | 0.01163 | 0.0092  |
| 20 | 0.01944 | 0.02222 | 48 | 0.0114  | 0.01036 | 76 | 0.00713 | 0.0054  | 104 | 0.01544 | 0.01762 |
| 21 | 0.009   | 0.0199  | 49 | 0.00682 | 0.00857 | 77 | 0.02002 | 0.02485 | 105 | 0.01541 | 0.01339 |
| 22 | 0.0117  | 0.0114  | 50 | 0.0123  | 0.02204 | 78 | 0.01164 | 0.01087 | 106 | 0.0054  | 0.00433 |
| 23 | 0.0232  | 0.0221  | 51 | 0.02039 | 0.0225  | 79 | 0.01766 | 0.0261  | 107 | 0.00436 | 0.00645 |
| 24 | 0.0073  | 0.011   | 52 | 0.01221 | 0.02364 | 80 | 0.01822 | 0.02933 | 108 | 0.02079 | 0.02016 |
| 25 | 0.0226  | 0.0174  | 53 | 0.0119  | 0.02375 | 81 | 0.0106  | 0.0246  | 109 | 0.00552 | 0.07018 |
| 26 | 0.0312  | 0.0144  | 54 | 0.01204 | 0.02361 | 82 | 0.01552 | 0.01421 | 110 | 0.01354 | 0.01331 |
| 27 | 0.0193  | 0.0188  | 55 | 0.02058 | 0.02232 | 83 | 0.02697 | 0.07157 |     |         |         |
| 28 | 0.0139  | 0.013   | 56 | 0.0113  | 0.0247  | 84 | 0.01912 | 0.02332 |     |         |         |

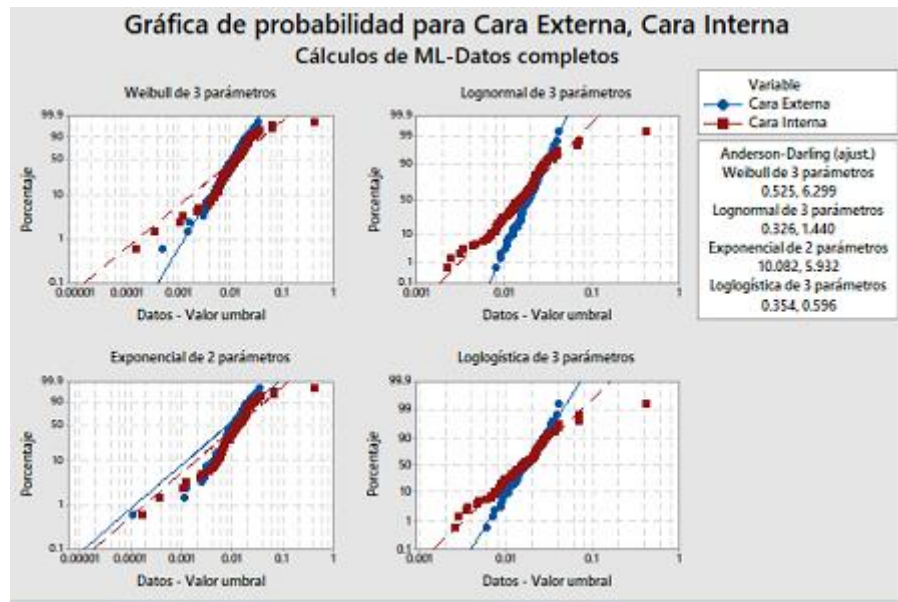


Figura 3.5

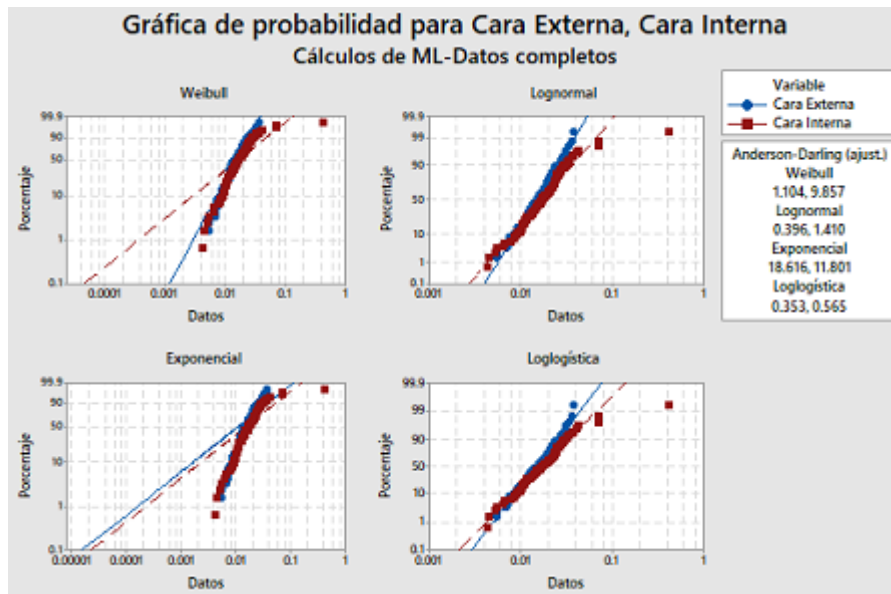


Figura 3.5

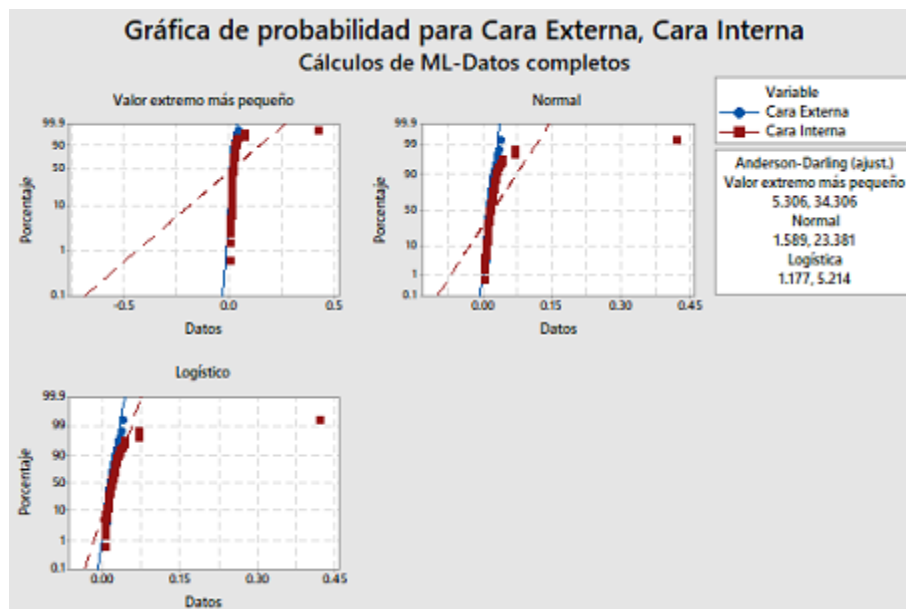


Figura 3.3

Al analizar las gráficas en la figura 3.5 de las diferentes distribuciones se observó que los datos se ajustan a la distribución log normal, por lo tanto se normalizaron los valores aplicando el logaritmo base 10. Como el LEI es de 0 micras y no existe el logaritmo base 10 del cero, primero se procedió sumar una constante a todos los valores (0.001) y después se obtuvo el logaritmo de todos los datos. Con estos valores se realizó el estudio de capacidad.

Al normalizar los datos el LEI es de  $-3$  y el LES es de  $-1.585$ .

En la tabla 3.4 se muestran los datos normalizados y con estos se realizó el estudio de capacidad usando el software Minitab 17.

Tabla 3.4 Datos normalizados del runout de 110 árboles de levas.

|    | Cara Ext | Cara Int |    | Cara Ext | Cara Int |    | Cara Ext | Cara Int |     | Cara Ext | Cara Int |
|----|----------|----------|----|----------|----------|----|----------|----------|-----|----------|----------|
| 1  | -1.767   | -1.7033  | 29 | -2.00966 | -1.4816  | 57 | -1.9431  | -1.9508  | 85  | -1.7929  | -1.5926  |
| 2  | -1.86328 | -1.8153  | 30 | -1.77469 | -1.7595  | 58 | -1.74958 | -1.757   | 86  | -1.73707 | -1.7185  |
| 3  | -1.74958 | -1.7932  | 31 | -1.57988 | -1.4599  | 59 | -1.9393  | -1.9508  | 87  | -1.77702 | -1.8011  |
| 4  | -1.64975 | -1.6517  | 32 | -1.69465 | -1.6819  | 60 | -1.71444 | -1.7217  | 88  | -1.77547 | -1.7392  |
| 5  | -1.73049 | -1.618   | 33 | -1.6073  | -1.6383  | 61 | -1.92191 | -1.9435  | 89  | -2.07109 | -2.0026  |
| 6  | -1.88273 | -1.9136  | 34 | -2.07572 | -1.9031  | 62 | -1.93219 | -1.9622  | 90  | -1.74763 | -1.67    |
| 7  | -1.75203 | -1.8069  | 35 | -1.55021 | -1.5418  | 63 | -1.63004 | -1.6203  | 91  | -1.88807 | -1.8088  |
| 8  | -1.81816 | -1.8633  | 36 | -1.76828 | -1.7972  | 64 | -1.85918 | -1.8983  | 92  | -1.53611 | -1.5998  |
| 9  | -1.61261 | -1.5654  | 37 | -1.89313 | -1.6029  | 65 | -1.80688 | -1.7397  | 93  | -1.70224 | -1.7916  |
| 10 | -1.86328 | -1.8601  | 38 | -1.66115 | -1.6529  | 66 | -1.99525 | -1.7071  | 94  | -1.74909 | -1.757   |
| 11 | -1.80688 | -1.8013  | 39 | -2       | -1.9101  | 67 | -1.5938  | -1.5976  | 95  | -1.42969 | -0.3745  |
| 12 | -1.83121 | -1.9401  | 40 | -1.83268 | -1.8386  | 68 | -1.63582 | -1.5913  | 96  | -1.70027 | -1.7515  |
| 13 | -1.87484 | -1.4253  | 41 | -1.66514 | -2.2565  | 69 | -1.64801 | -1.667   | 97  | -1.46852 | -1.3688  |
| 14 | -1.86934 | -1.5294  | 42 | -1.75845 | -1.9176  | 70 | -1.67985 | -1.7565  | 98  | -1.99097 | -2.1152  |
| 15 | -1.86646 | -1.3712  | 43 | -1.40472 | -1.4082  | 71 | -2.0048  | -2.0255  | 99  | -1.84466 | -1.8505  |
| 16 | -1.63941 | -1.5449  | 44 | -1.86107 | -1.7908  | 72 | -2.08407 | -2.2048  | 100 | -1.83091 | -1.8965  |
| 17 | -1.72816 | -1.7352  | 45 | -1.69767 | -1.5539  | 73 | -2.04479 | -1.8274  | 101 | -1.89483 | -1.9918  |
| 18 | -1.86107 | -1.9519  | 46 | -1.7113  | -1.6887  | 74 | -1.97469 | -2.055   | 102 | -1.49826 | -1.5355  |
| 19 | -1.88472 | -1.9566  | 47 | -1.48999 | -1.4791  | 75 | -1.5379  | -1.5127  | 103 | -1.8986  | -1.9914  |
| 20 | -1.68952 | -1.6341  | 48 | -1.90658 | -1.9446  | 76 | -2.08991 | -2.1938  | 104 | -1.7841  | -1.73    |
| 21 | -2       | -1.6799  | 49 | -2.10679 | -2.0191  | 77 | -1.67737 | -1.5875  | 105 | -1.78489 | -1.8419  |
| 22 | -1.8962  | -1.9066  | 50 | -1.87615 | -1.6375  | 78 | -1.89825 | -1.9255  | 106 | -2.19382 | -2.2733  |
| 23 | -1.61618 | -1.6364  | 51 | -1.66979 | -1.6289  | 79 | -1.72909 | -1.567   | 107 | -2.27084 | -2.1278  |
| 24 | -2.08092 | -1.9208  | 52 | -1.8791  | -1.6084  | 80 | -1.71625 | -1.5181  | 108 | -1.66174 | -1.6745  |
| 25 | -1.62709 | -1.7352  | 53 | -1.88941 | -1.6064  | 81 | -1.93554 | -1.5918  | 109 | -2.18575 | -1.1476  |
| 26 | -1.49214 | -1.8125  | 54 | -1.88472 | -1.6089  | 82 | -1.78199 | -1.8179  | 110 | -1.83744 | -1.8444  |
| 27 | -1.6925  | -1.7033  | 55 | -1.66595 | -1.6323  | 83 | -1.55331 | -1.1392  |     |          |          |
| 28 | -1.82681 | -1.8539  | 56 | -1.91009 | -1.5901  | 84 | -1.69637 | -1.614   |     |          |          |

El informe de capacidad del proceso, figura 4.4, arrojó que los índices de capacidad de corto plazo (Cpk) para la cara externa e interna son 0.41 y 0.23 que están muy alejados del valor estándar para un proceso aceptable el cual es de 1.33.

### 3.4.2 DEFINIR LOS OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

El objetivo para el desempeño del proceso es lograr que tenga un nivel de 4 sigmas o mayor, figura 3.6 lo cual se verá reflejado con un Cpk de 1.33 y con esto se tendrá un valor de PPM de 6182.56 piezas fuera de especificaciones lo cual representa el 1.714% de las PPM actuales.

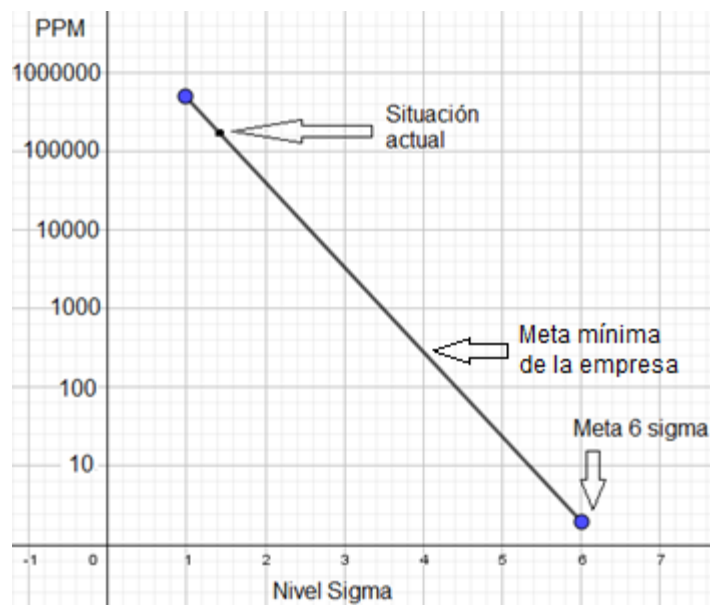


Figura 3.4 Nivel sigma objetivo para el proceso

### 3.4.3 IDENTIFICAR LAS FUENTES DE VARIACIÓN

Para identificar las operaciones o factores que influyen en la variabilidad del runout de las caras de la brida se realizó una reunión con el personal de calidad así como con los operadores de las diferentes etapas del proceso. A través de una lluvia de ideas y después de mucha deliberación concluimos que la operación 60, tratamiento térmico, es la operación que más influye en el runout.

### 3.5 FASE DE MEJORA

#### 3.5.1 TAMIZAR LAS CAUSAS POTENCIALES

Para validar el efecto de la operación 60 en el runout de las caras de la brida, se realizó un diseño de experimentos (DOE) fraccionado con 6 factores a dos niveles ( $2^{6-2}_{IV}$ ), el diseño tendrá cuatro bloques pues a la empresa le interesa conocer el efecto de la operación en el modelo Mx-610 y se utilizarán dos coladas diferentes provenientes de fundición. En la tabla 3.5 se muestran los factores que afectan el proceso en la operación 60 y las variables de respuesta que se medirán.

Tabla 3.5 Factores y variables de respuesta del DOE.

| Factores                | Valores |            |            | Variables de respuesta     |
|-------------------------|---------|------------|------------|----------------------------|
|                         | Actual  | Nivel bajo | Nivel alto |                            |
| Tiempo de calentamiento | 3.9     | 3.7        | 4.1        | <b>Runout cara externa</b> |
| Tiempo de enfriamiento  | 17      | 15.3       | 18.7       | <b>Runout cara interna</b> |
| Concentración de Quench | 12      | 11         | 13         |                            |
| Potencia                | 42      | 40.7       | 43.3       |                            |
| Demora                  | 1       | 0.9        | 1.1        |                            |
| Flujo del Quench        | 9.9     | 9.4        | 10.4       |                            |

Los valores de los factores en el nivel bajo y el nivel alto se decidieron en conjunto con el personal de calidad, quienes indicaron hasta que valor mínimo o máximo podíamos bajar un factor sin poner en riesgo la operación de tratamiento térmico.

El desarrollo del DOE se realizó con el software Design Expert 7, el cual indica el orden de las corridas y en qué nivel debe estar cada factor, esto se observa en la figura 3.6.

| Std | Run | Block       | Factor 1<br>A:T calentamiento | Factor 2<br>B:T enfriamiento | Factor 3<br>C:Conc Quench | Factor 4<br>D:Potencia | Factor 5<br>E:Demora | Factor 6<br>F:F Quench |
|-----|-----|-------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| 1   | 1   | 610 Externo | 3.70                          | 15.30                        | 11.00                     | 40.70                  | 0.90                 | 9.40                   |
| 8   | 2   | 610 Externo | 4.10                          | 18.70                        | 13.00                     | 40.70                  | 1.10                 | 9.40                   |
| 12  | 3   | 610 Externo | 4.10                          | 18.70                        | 11.00                     | 43.30                  | 0.90                 | 10.40                  |
| 13  | 4   | 610 Externo | 3.70                          | 15.30                        | 13.00                     | 43.30                  | 1.10                 | 10.40                  |
| 2   | 5   | 610 Interno | 4.10                          | 15.30                        | 11.00                     | 40.70                  | 1.10                 | 10.40                  |
| 7   | 6   | 610 Interno | 3.70                          | 18.70                        | 13.00                     | 40.70                  | 0.90                 | 10.40                  |
| 14  | 7   | 610 Interno | 4.10                          | 15.30                        | 13.00                     | 43.30                  | 0.90                 | 9.40                   |
| 11  | 8   | 610 Interno | 3.70                          | 18.70                        | 11.00                     | 43.30                  | 1.10                 | 9.40                   |
| 6   | 9   | 618 Externo | 4.10                          | 15.30                        | 13.00                     | 40.70                  | 0.90                 | 10.40                  |
| 15  | 10  | 618 Externo | 3.70                          | 18.70                        | 13.00                     | 43.30                  | 0.90                 | 9.40                   |
| 3   | 11  | 618 Externo | 3.70                          | 18.70                        | 11.00                     | 40.70                  | 1.10                 | 10.40                  |
| 10  | 12  | 618 Externo | 4.10                          | 15.30                        | 11.00                     | 43.30                  | 1.10                 | 9.40                   |
| 16  | 13  | 618 Interno | 4.10                          | 18.70                        | 13.00                     | 43.30                  | 1.10                 | 10.40                  |
| 4   | 14  | 618 Interno | 4.10                          | 18.70                        | 11.00                     | 40.70                  | 0.90                 | 9.40                   |
| 9   | 15  | 618 Interno | 3.70                          | 15.30                        | 11.00                     | 43.30                  | 0.90                 | 10.40                  |
| 5   | 16  | 618 Interno | 3.70                          | 15.30                        | 13.00                     | 40.70                  | 1.10                 | 9.40                   |

Figura 3.5 Orden de las corridas del DOE

### 3.5.2 PUNTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN

Al finalizar las corridas del diseño de experimentos se procedió a medir el runout en la cara de la brida de cada una de las piezas involucradas. Después se vaciaron los datos en el software Desing Expert 7, para determinar los valores óptimos de los factores que produzcan la variabilidad mínima (factores vitales). Estos valores se muestran en el capítulo 4.

### 3.5.3 TOLERANCIAS DE OPERACIÓN

Al determinar el valor óptimo de cada factor vital que influye en la operación 60, a través de los resultados del diseño de experimentos, se determinó el rango de operación de cada factor que resulte significativo para el CTQ analizando los coeficientes del modelo matemático que arroje el software.

### 3.6 FASE DE CONTROL

#### 3.6.1 VALIDAR EL SISTEMA DE MEDICIÓN

El equipo de control de calidad de la empresa se encargó de ajustar y calibrar la máquina Adcole, ya que en la fase de medición se obtuvo que el sistema de medición no es aceptable. Ellos contactaron a personal quienes ajustaron la máquina y así tener un sistema de medición aceptable.

#### 3.6.2 DETERMINAR CAPACIDAD DE PROCESO

Al implementar el punto óptimo de operación en el proceso se tomaron datos de 100 árboles de levas y con estos se realizó el estudio de capacidad del proceso para determinar el valor del Cpk. Los datos se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Datos del runout de 100 árboles de levas.

|    | Cara Ext | Cara Int |    | Cara Ext | Cara Int |    | Cara Ext | Cara Int |    | Cara Ext | Cara Int |
|----|----------|----------|----|----------|----------|----|----------|----------|----|----------|----------|
| 1  | 0.01873  | 0.02265  | 26 | 0.01236  | 0.01108  | 51 | 0.01666  | 0.01354  | 76 | 0.0083   | 0.00672  |
| 2  | 0.01153  | 0.01051  | 27 | 0.01699  | 0.01614  | 52 | 0.01651  | 0.01386  | 77 | 0.01576  | 0.01867  |
| 3  | 0.00485  | 0.00411  | 28 | 0.01298  | 0.01289  | 53 | 0.01244  | 0.01258  | 78 | 0.01192  | 0.01001  |
| 4  | 0.00486  | 0.00388  | 29 | 0.01879  | 0.01727  | 54 | 0.00996  | 0.0101   | 79 | 0.01739  | 0.02448  |
| 5  | 0.01317  | 0.0123   | 30 | 0.02207  | 0.02195  | 55 | 0.01437  | 0.01409  | 80 | 0.01973  | 0.02007  |
| 6  | 0.02202  | 0.02254  | 31 | 0.02216  | 0.02186  | 56 | 0.02264  | 0.02334  | 81 | 0.0117   | 0.01507  |
| 7  | 0.01277  | 0.01067  | 32 | 0.01805  | 0.0182   | 57 | 0.00571  | 0.00713  | 82 | 0.01928  | 0.02121  |
| 8  | 0.01348  | 0.01264  | 33 | 0.01871  | 0.01935  | 58 | 0.01304  | 0.01262  | 83 | 0.01129  | 0.0108   |
| 9  | 0.02378  | 0.02109  | 34 | 0.01899  | 0.01917  | 59 | 0.0061   | 0.00674  | 84 | 0.01396  | 0.01221  |
| 10 | 0.01514  | 0.01519  | 35 | 0.01551  | 0.01519  | 60 | 0.00415  | 0.00451  | 85 | 0.01791  | 0.0183   |
| 11 | 0.00976  | 0.01369  | 36 | 0.0166   | 0.01305  | 61 | 0.01204  | 0.01295  | 86 | 0.01053  | 0.0124   |
| 12 | 0.01219  | 0.01229  | 37 | 0.00831  | 0.00906  | 62 | 0.00842  | 0.00886  | 87 | 0.01777  | 0.01709  |
| 13 | 0.01022  | 0.00953  | 38 | 0.00646  | 0.00754  | 63 | 0.01184  | 0.01279  | 88 | 0.0148   | 0.01533  |
| 14 | 0.01016  | 0.00979  | 39 | 0.0044   | 0.0051   | 64 | 0.00859  | 0.0183   | 89 | 0.0152   | 0.01521  |
| 15 | 0.01452  | 0.0142   | 40 | 0.01362  | 0.01368  | 65 | 0.01754  | 0.01673  | 90 | 0.02126  | 0.01715  |
| 16 | 0.01766  | 0.01928  | 41 | 0.00755  | 0.00586  | 66 | 0.01191  | 0.01198  | 91 | 0.02118  | 0.01699  |
| 17 | 0.02211  | 0.02053  | 42 | 0.00852  | 0.01033  | 67 | 0.01635  | 0.01567  | 92 | 0.02113  | 0.01697  |
| 18 | 0.00883  | 0.01319  | 43 | 0.00879  | 0.01061  | 68 | 0.01613  | 0.01541  | 93 | 0.01946  | 0.02148  |
| 19 | 0.01433  | 0.0146   | 44 | 0.01139  | 0.01026  | 69 | 0.01767  | 0.01583  | 94 | 0.02462  | 0.0198   |
| 20 | 0.01778  | 0.02472  | 45 | 0.00925  | 0.00732  | 70 | 0.00553  | 0.00885  | 95 | 0.01366  | 0.0095   |
| 21 | 0.01753  | 0.01555  | 46 | 0.00714  | 0.00757  | 71 | 0.01424  | 0.01605  | 96 | 0.0132   | 0.01189  |

|           |         |         |           |         |         |           |         |         |            |         |         |
|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|------------|---------|---------|
| <b>22</b> | 0.00542 | 0.007   | <b>47</b> | 0.01123 | 0.01214 | <b>72</b> | 0.01841 | 0.02169 | <b>97</b>  | 0.01544 | 0.01495 |
| <b>23</b> | 0.01516 | 0.015   | <b>48</b> | 0.00687 | 0.00632 | <b>73</b> | 0.02179 | 0.02448 | <b>98</b>  | 0.00571 | 0.00674 |
| <b>24</b> | 0.01819 | 0.01801 | <b>49</b> | 0.00881 | 0.00774 | <b>74</b> | 0.02274 | 0.02468 | <b>99</b>  | 0.01692 | 0.00852 |
| <b>25</b> | 0.01573 | 0.01539 | <b>50</b> | 0.01358 | 0.01383 | <b>75</b> | 0.01571 | 0.0153  | <b>100</b> | 0.0111  | 0.00997 |

### **3.6.3 IMPLANTAR CONTROLES DE PROCESO**

Después de haber obtenido el punto óptimo de operación de los factores involucrados en el runout de las caras de la brida, se definieron los controles que se deben institucionalizar sobre los factores vitales para lograr que estos operen consistentemente a través de un Plan de control, el cual indica las acciones, los procedimientos de operación, la nueva hoja de trabajo donde se indican los niveles, el monitoreo que se debe realizar para que la operación se estandarice y sea estable a través del tiempo



## **Capítulo 4 RESULTADOS**

### **4.1 FASE DE DEFINICIÓN**

En esta fase se determinó que el CTQ con mayor variabilidad es el runout en la cara de la brida de la pieza MX-618, ya que tiene un alto índice de retrabajo que llega a ser de hasta 15% de piezas defectuosas (dato de la empresa) y scrap.

### **4.2 FASE DE MEDICIÓN**

Se realizó el mapeo de proceso de la línea que se muestra en la figura 4.1, para esto se recorrió la línea en compañía del jefe de piso y personal de calidad quienes mostraron las operaciones de maquinado y sus características propias de cada una. Se revisaron las hojas de instrucción de inspección de cada operación para conocer a fondo las características de salida de cada operación y con esto se definieron los estándares de desempeño para la brida los cuales se muestran en la figura 4.2

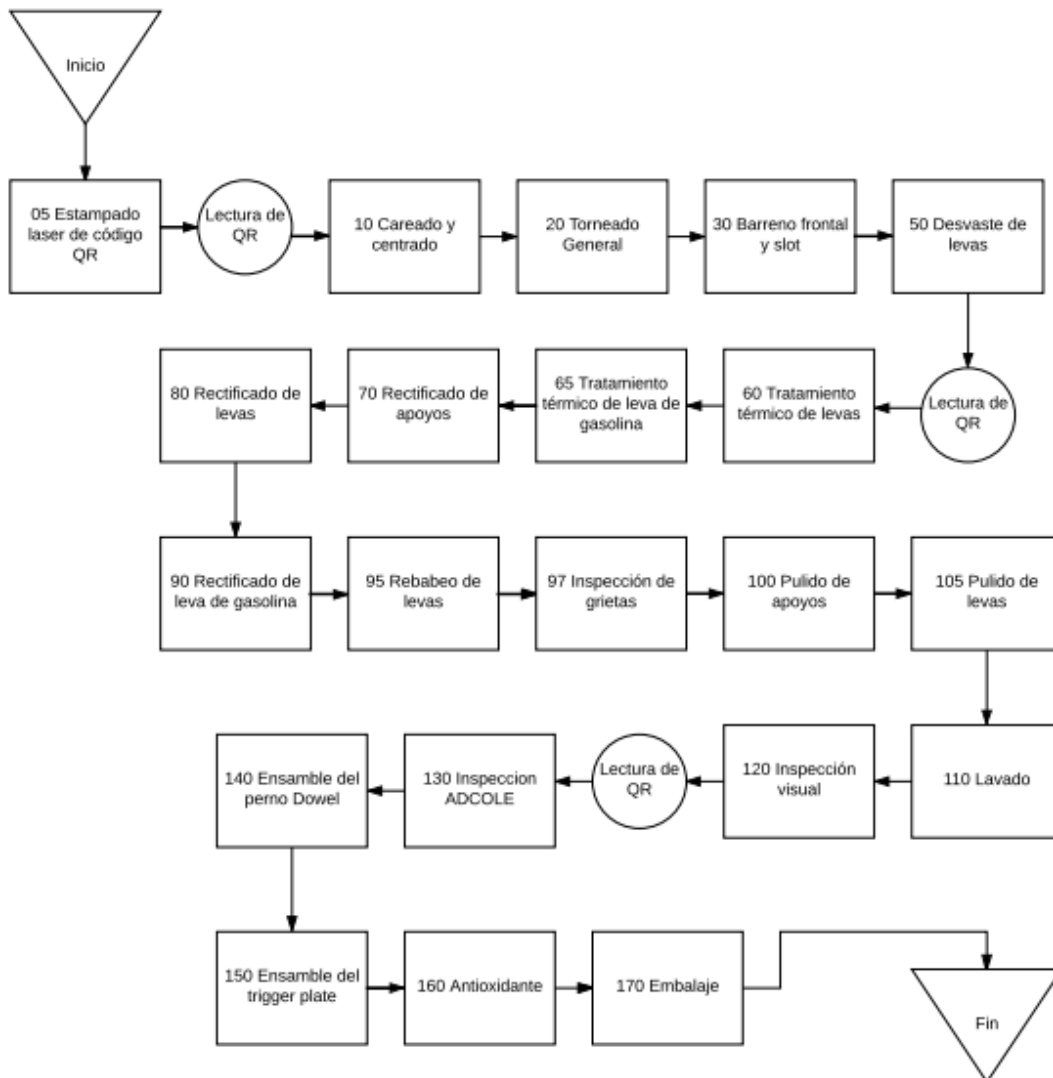


Figura 4.1 Mapa de proceso de la pieza Mx-618

Se definieron las estándares de desempeño de la brida en base al último análisis y tomando en consideración la demanda del cliente. La brida, plato de anclaje, debe girar perpendicularmente respecto al eje horizontal del árbol de levas, el runout es la variación que se tiene cuando el giro se sale de la vertical, figura 4.2.

Los estándares de especificación de la cara interna y externa debe estar entre el límite de especificación inferior de 0 micras (LEI) y el límite de especificación superior de 25 micras (LES).

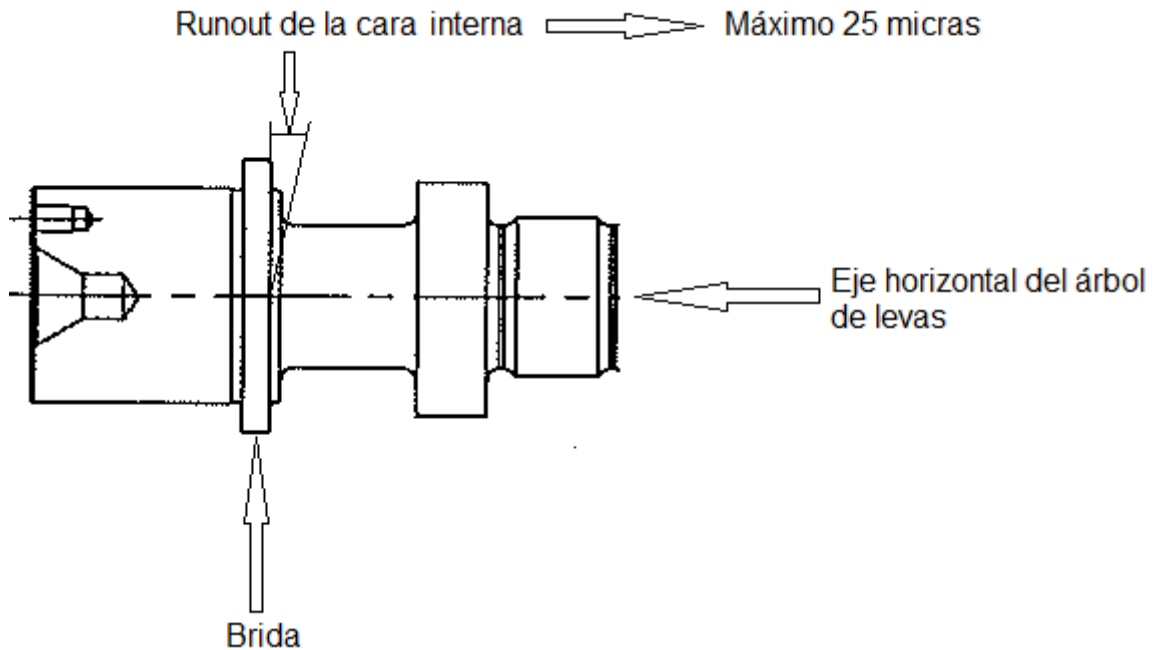


Figura 4.2 Descripción gráfica del runout de la brida.

Se validó el sistema de medición por el método de apalancamiento, en la fase 1 se tomaron 30 piezas de manera aleatoria y se les midió el runout, en la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos. De los datos se obtiene que la media  $\bar{y}_0$  es de 0.01711 y 0.01712 para las caras externa e interna respectivamente y las varianzas  $\hat{\sigma}_t^2$  de 6.2221E-05 y 5.19E-05.

A continuación se realizó la selección de una muestra de tamaño  $k = 5$  piezas, las cuales tienen valores extremos a la media de la muestra aleatoria de la línea base, esto es para incluir toda la variabilidad de la medición (apalancar). Los datos de las 30 piezas y las 5 piezas seleccionadas se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Datos de la línea base del runout de las caras externa e interna de 30 piezas en mm.

|          | Ext           | Int           |    | Ext    | Int    |           | Ext           | Int           |
|----------|---------------|---------------|----|--------|--------|-----------|---------------|---------------|
| 1        | 0.0166        | 0.0161        | 11 | 0.0055 | 0.0083 | 21        | 0.0143        | 0.0135        |
| 2        | 0.0188        | 0.0172        | 12 | 0.0096 | 0.0119 | <b>22</b> | <b>0.0051</b> | <b>0.0067</b> |
| 3        | 0.0161        | 0.0167        | 13 | 0.0151 | 0.0187 | 23        | 0.0102        | 0.0131        |
| <b>4</b> | <b>0.0392</b> | <b>0.0352</b> | 14 | 0.0134 | 0.0118 | 24        | 0.024         | 0.0228        |
| 5        | 0.0116        | 0.0138        | 15 | 0.0121 | 0.0127 | 25        | 0.0177        | 0.0184        |
| 6        | 0.0171        | 0.0151        | 16 | 0.0221 | 0.0226 | 26        | 0.0109        | 0.0079        |
| 7        | 0.0136        | 0.0175        | 17 | 0.0221 | 0.0227 | <b>27</b> | <b>0.0373</b> | <b>0.0344</b> |
| 8        | 0.024         | 0.0247        | 18 | 0.0201 | 0.0182 | <b>28</b> | <b>0.0076</b> | <b>0.0041</b> |
| 9        | 0.016         | 0.0192        | 19 | 0.018  | 0.0169 | 29        | 0.0147        | 0.0158        |
| 10       | 0.0187        | 0.0182        | 20 | 0.0137 | 0.0113 | <b>30</b> | <b>0.0282</b> | <b>0.0281</b> |

A continuación a las 5 piezas seleccionadas se les realizaron 6 mediciones, los resultados de las mismas así como la varianza de los datos se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Datos de las 6 mediciones de las piezas seleccionadas.

|          | Pieza 4         |                 | Pieza 22        |                | Pieza 27       |                | Pieza 28        |                 | Pieza 30        |                 |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|          | Ext             | Int             | Ext             | Int            | Ext            | Int            | Ext             | Int             | Ext             | Int             |
|          | 0.04            | 0.0359          | 0.0089          | 0.0072         | 0.0476         | 0.0347         | 0.0061          | 0.0044          | 0.0288          | 0.0283          |
|          | 0.0398          | 0.0359          | 0.0085          | 0.0056         | 0.0374         | 0.0346         | 0.0062          | 0.0047          | 0.0283          | 0.028           |
|          | 0.0397          | 0.0359          | 0.0088          | 0.0085         | 0.0372         | 0.0351         | 0.0061          | 0.0063          | 0.0284          | 0.0291          |
|          | 0.0401          | 0.0356          | 0.0085          | 0.0068         | 0.0368         | 0.0378         | 0.0061          | 0.0059          | 0.0287          | 0.0287          |
|          | 0.04            | 0.0365          | 0.0085          | 0.0069         | 0.037          | 0.0383         | 0.012           | 0.0068          | 0.0284          | 0.0287          |
|          | 0.0324          | 0.0358          | 0.0086          | 0.0091         | 0.0368         | 0.0382         | 0.0117          | 0.0174          | 0.0277          | 0.0301          |
| Media    | 0.0387          | 0.0359          | 0.0086          | 0.0074         | 0.0388         | 0.0365         | 0.0080          | 0.0076          | 0.0284          | 0.0288          |
| Varianza | 9.44667<br>E-06 | 9.06667<br>E-08 | 3.06667<br>E-08 | 1.5950<br>E-06 | 1.8640<br>E-05 | 3.3230<br>E-06 | 8.75067<br>E-06 | 2.39817<br>E-05 | 1.49667<br>E-07 | 5.37667<br>E-07 |

Usando el estimador de ANOVA se calculó el coeficiente de correlación intraclase para la cara externa y para la cara interna de la brida.

$$\hat{\rho}_a = 1 - \frac{MSW}{\hat{\sigma}_t^2} = 1 - \frac{(s_4^2 + s_{22}^2 + s_{27}^2 + s_{28}^2 + s_{30}^2)/(5)}{\hat{\sigma}_t^2}$$

$$\hat{\rho}_{ext} = 1 - \frac{9.44667 \times 10^{-6} + 3.06667 \times 10^{-8} + 1.864 \times 10^{-5} + 8.75067 \times 10^{-6} + 1.49667 \times 10^{-7}}{5} \div 6.2221 \times 10^{-5} = 0.881$$

$$\hat{\rho}_{int} = 1 - \frac{9.06667 \times 10^{-8} + 1.595 \times 10^{-6} + 3.323 \times 10^{-6} + 2.39817 \times 10^{-5} + 5.37667 \times 10^{-7}}{5} \div 5.19 \times 10^{-5} = 0.8862$$

Como se puede observar se obtiene un coeficiente de correlación intraclase para la cara externa de 0.881 y para la cara interna de 0.8862 los cuales al contrastarlos con los valores de la tabla 3.2 se demuestra que el sistema de medición de la empresa no es aceptable.

Como resultado de este análisis a la empresa se le recomendó calibrar la máquina Adcole para corregir los errores en las mediciones posteriores.

### 4.3 FASE DE ANÁLISIS

Al analizar las operaciones del mapa de proceso, se concluyó que la operación 20 y la operación 60 son las operaciones donde la brida tiene afectación directa, ya que en la operación 20 es donde se maquina la brida y sale como parte terminada; en la operación 60 se lleva a cabo un tratamiento térmico donde todo el árbol de levas se ve afectado, se analizaron las desviaciones de las mediciones de salida de las operaciones y resultó que la operación 60 es el punto crítico donde el runout de la cara de la brida se incrementa, figura 4.3.

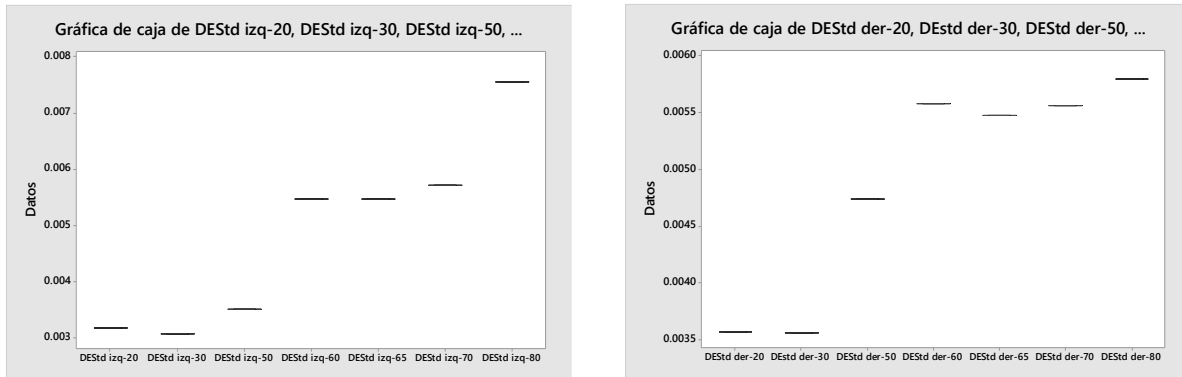


Figura 4.3 Comparación de la desviación entre operaciones.

### 4.3.1 ESTUDIO DE CAPACIDAD

Los resultados que se obtuvieron del estudio de capacidad se muestran en la figura 4.4. El estudio arrojó un Cpk de 0.41 y 0.23 para la cara externa e interna de la brida respectivamente, esto demuestra que el proceso está muy alejado del valor de Cpk de 1.33, el cual es el valor estándar para un proceso aceptable.

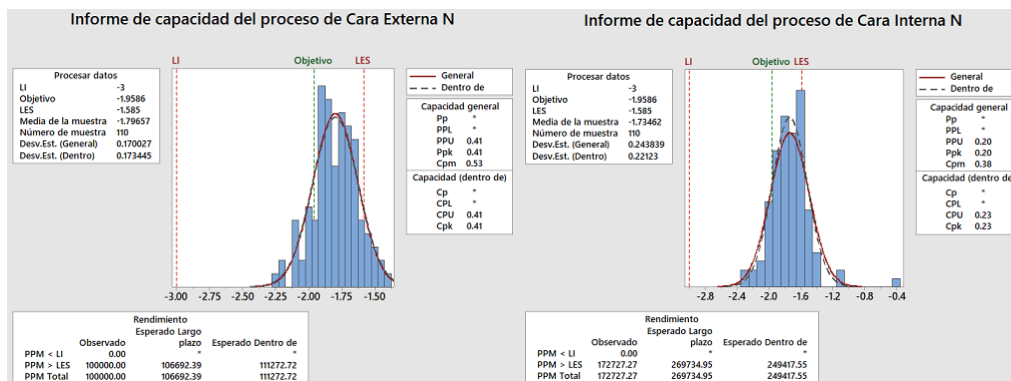


Figura 4.4 Informe de capacidad de proceso de ambas caras de la brida.

Se observa claramente que la media del proceso está desplazada del valor objetivo, esto arroja que la PPM de la cara externa sean de 106,692.39 y de la cara interna sean de 269,734.95, lo que da un total de PPM de 376,427.34 a largo plazo.

Al calcular del nivel sigma del proceso se utilizó la ecuación de Schmidt y Launsby y las PPM de largo plazo que son 376,427.34:

$$\text{Nivel de calidad en sigmas}(Z_c) = 0.8406 + \sqrt{29.37 - 2.221 * \ln(\text{PPM})}$$

$$\text{Nivel de calidad en sigmas}(Z_c) = 0.8406 + \sqrt{29.37 - 2.221 * \ln(376427.34)}$$

$$\text{Nivel de calidad en sigmas}(Z_c) = 1.7657$$

Este nivel sigma de 1.7657 le ocasiona a la empresa costos por mala calidad de más del 30% de las ventas y la posiciona como una empresa no competitiva.

#### 4.4 FASE DE MEJORA

Los resultados del diseño de experimentos que arrojó el software Desing Expert 7 se muestran en la figura 4.5. Se observa que el modelo estadístico es significativo y por ende, los valores que arrojó son válidos.

**ANOVA for selected factorial model**

**Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]**

| Source                      | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F |             |
|-----------------------------|----------------|----|-------------|---------|------------------|-------------|
| Block                       | 145.19         | 3  | 48.40       |         |                  |             |
| Model                       | 409.44         | 7  | 58.49       | 17.93   | 0.0029           | significant |
| <i>A-T de calentamiento</i> | 27.56          | 1  | 27.56       | 8.45    | 0.0335           |             |
| <i>C-% de Quench</i>        | 1.56           | 1  | 1.56        | 0.48    | 0.5197           |             |
| <i>D-Potencia</i>           | 0.063          | 1  | 0.063       | 0.019   | 0.8953           |             |
| <i>F-Flujo de Qt</i>        | 60.06          | 1  | 60.06       | 18.41   | 0.0078           |             |
| <i>AC</i>                   | 162.56         | 1  | 162.56      | 49.83   | 0.0009           |             |
| <i>AD</i>                   | 105.06         | 1  | 105.06      | 32.20   | 0.0024           |             |
| <i>CD</i>                   | 52.56          | 1  | 52.56       | 16.11   | 0.0102           |             |
| Residual                    | 16.31          | 5  | 3.26        |         |                  |             |
| Cor Total                   | 570.94         | 15 |             |         |                  |             |

Figura 4.5. Anova del diseño de experimentos.

Se obtuvo que los factores vitales para el runout de laas caras de la brida son el tiempo de calentamiento y el flujo de Quench, en la figura 4.6 se observa la superficie de respuesta del runout de la brida. Los factores % de Quench y la potencia también son

factores involucrados en la variabilidad del runout aunque en menor medida, la demora y el tiempo de enfriamiento no resultaron significativos.

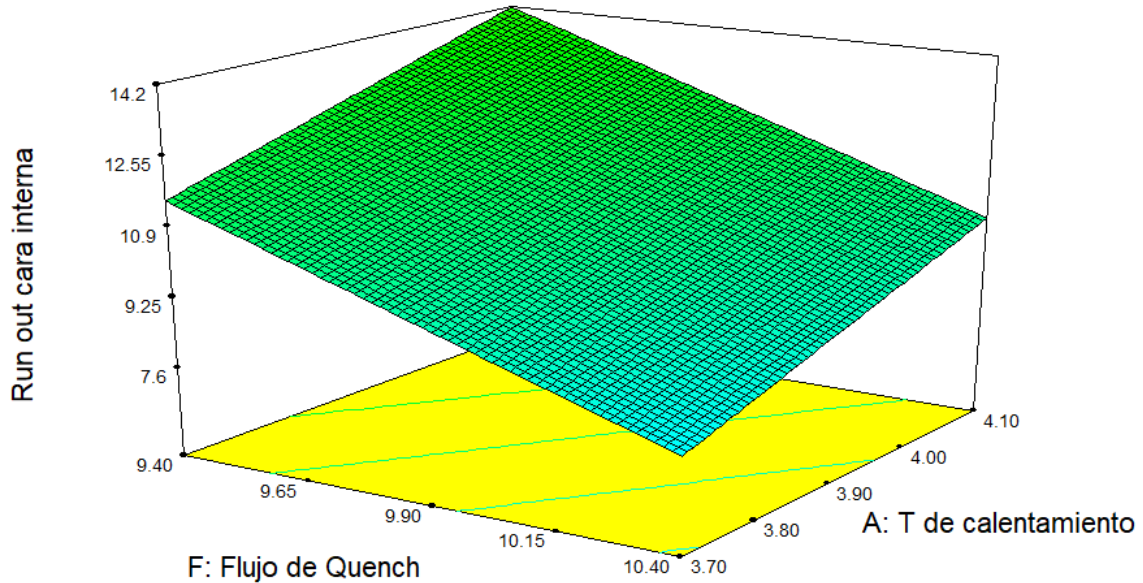


Figura 4.6. Superficie de respuesta del runout de la brida.

El punto óptimo de operación de todos los factores para obtener los mínimos valores del runout de las dos caras de la brida se muestran en la figura 4.7, estos valores son deseables en un 0.925, donde el valor máximo de la deseabilidad es 1.

| Constraints        |                  |             |             |              |              |            |
|--------------------|------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|
| Name               | Goal             | Lower Limit | Upper Limit | Lower Weight | Upper Weight | Importance |
| T de calentamiento | is target = 3.70 | 3.7         | 4.1         | 1            | 1            | 3          |
| T de enfriamiento  | is in range      | 15.3        | 18.7        | 1            | 1            | 3          |
| % de Quench        | is in range      | 11          | 13          | 1            | 1            | 3          |
| Potencia           | is in range      | 40.7        | 43.3        | 1            | 1            | 3          |
| Demora             | is in range      | 0.9         | 1.1         | 1            | 1            | 3          |
| Flujo de Quench    | is in range      | 9.4         | 10.4        | 1            | 1            | 3          |
| Run out cara ex    | is target = 0    | 0           | 25          | 1            | 1            | 3          |
| Run out cara int   | is target = 0    | 0           | 25          | 1            | 1            | 3          |

| Solutions |                    |                   |              |              |             |                 |                 |                 |              |
|-----------|--------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Number    | T de calentamiento | T de enfriamiento | % de Quench  | Potencia     | Demora      | Flujo de Quench | Run out cara ex | Run out cara in | Desirability |
| 1         | <u>3.70</u>        | <u>15.30</u>      | <u>13.00</u> | <u>40.74</u> | <u>0.90</u> | <u>10.40</u>    | <u>1.41119</u>  | <u>4.04883</u>  | <u>0.925</u> |

Figura 4.7. Punto óptimo de operación de los factores.



Para las predicciones futuras los resultados son bastante favorables ya que con 95% de confianza, la predicción tanto de la cara externa como de la cara interna, están muy por debajo del límite de especificación superior el cual es de 25 micras, en la figura 4.8 se muestran los intervalos de confianza para las predicciones del runout de las caras de la brida.

| Factor | Name               | Level | Low Level | High Level | Std. Dev. | Coding |
|--------|--------------------|-------|-----------|------------|-----------|--------|
| A      | T de calentamiento | 3.70  | 3.70      | 4.10       | 0.000     | Actual |
| B      | T de enfriamiento  | 15.30 | 15.30     | 18.70      | 0.000     | Actual |
| C      | % de Quench        | 13.00 | 11.00     | 13.00      | 0.000     | Actual |
| D      | Potencia           | 40.74 | 40.70     | 43.30      | 0.000     | Actual |
| E      | Demora             | 0.90  | 0.90      | 1.10       | 0.000     | Actual |
| F      | Flujo de Quench    | 10.40 | 9.40      | 10.40      | 0.000     | Actual |

| Response          | Prediction | SE Mean | 95% CI low | 95% CI high | SE Pred | 95% PI low | 95% PI high |
|-------------------|------------|---------|------------|-------------|---------|------------|-------------|
| Run out cara ex   | 1.41119    | 1.79    | -4.30      | 7.12        | 2.91    | -7.84      | 10.66       |
| Run out cara inti | 4.04883    | 1.26    | 0.81       | 7.28        | 2.20    | -1.61      | 9.71        |

Figura 4.8. Intervalos de confianza de la predicción.

Las tolerancias de operación de los factores vitales involucrados en la variable de respuesta se ajustaron con un 5% respecto al valor óptimo de cada uno de ellos. Para esto se utilizó el modelo matemático que arrojó el Desing Expert el cual se muestra en la figura 4.9. Al realizar la simulación con los valores de tolerancia se obtuvo que el runout de la brida es de 0 micras para la cara externa y 5.37 micras para la cara interna.

**Final Equation in Terms of Actual Factors:**

$$\begin{aligned} \text{Run out} &= \\ &-1553.25529 \\ &+229.25481 * \text{T de calentamiento} \\ &-3.28606 * \% \text{ de Quench} \\ &+55.21635 * \text{Potencia} \\ &-3.87500 * \text{Flujo de Quench} \\ &+15.93750 * \text{T de calentamiento} * \% \text{ de Quench} \\ &-9.85577 * \text{T de calentamiento} * \text{Potencia} \\ &-1.39423 * \% \text{ de Quench} * \text{Potencia} \end{aligned}$$

Figura 4.9. Modelo matemático para el runout de la brida.

En la tabla 4.3 se muestran las tolerancias de operación de cada uno de los factores..

Tabla 4.3. Tolerancias de operación de los factores.

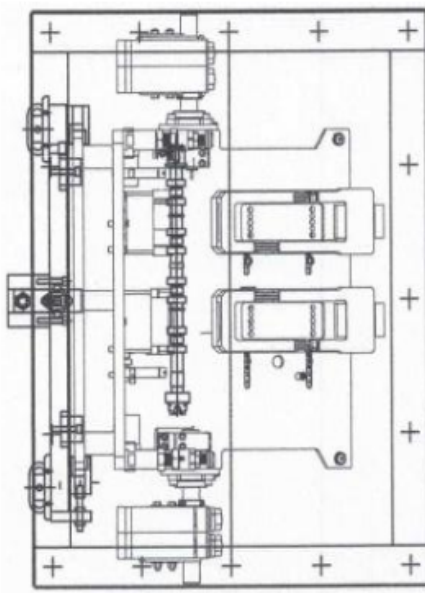
| Factor                  | Inferior | Óptimo | Superior |
|-------------------------|----------|--------|----------|
| Tiempo de calentamiento | 3.515    | 3.7    | 3.885    |
| % de Quench             | 12.35    | 13     | 13.65    |
| Potencia                | 38.703   | 40.74  | 42.777   |
| Flujo de Quench         | 9.88     | 10.4   | 10.92    |

#### **4.5 FASE DE CONTROL**

Con los resultados que se obtuvieron en la fase previa se recomienda a la empresa que se incluyan en la hoja de proceso (Anexo B) de la operación de tratamiento térmico para que el runout.

Es necesario que el personal de calidad realice un monitoreo continuo para que se mantengan los parámetros de operación y por ende, la variabilidad del runout de las caras de la brida se mantenga constante y en niveles mínimos.

# ANEXO A. Hoja de Proceso Operación 60

| <b>HOJA DE PROCESO</b>                                                              |                                                                                 | <b>OP. 60 TRATAMIENTO TÉRMICO DE LEVAS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                     |            |                            |                                                  |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------|----------------------------|--------------------------------------------------|--------|------------|------------|----------|---|--------------|--|--------|------------|-------------------------|-------------|---|-------------------|--|--------|------------|------------------------|---------------|---|-------------------|--|--|--|----------------------------|--------------------------------------------------|--|--|--|--|--|-------------------|--------|--|--|--|--|--|------------------------|-------------|--|--|--|--|--|-----------------------|-----------|
| DESCRIPCIÓN:<br>ARBOL DE LEVAS ESCAPE 1.5 LITS                                      | CLIENTE:                                                                        | No. PARTE CLIENTE: P54J-12441                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | No. EMPRESA: Mx-618 |            |                            |                                                  |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| ILUSTRACIÓN DE HERRAMIENTALES                                                       |                                                                                 | HTAS, HTALES Y DISP.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                     |            |                            |                                                  |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
|  |                                                                                 | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>No</th> <th>NOMBRE</th> <th>DISEÑO</th> <th>CODIGO</th> <th>FRECUENCIA</th> <th>PARÁMETROS</th> <th>ESPECIF.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>ACUATEMP 115</td> <td></td> <td>207017</td> <td>CADA 4 SEM</td> <td>TIEMPO DE CALENTAMIENTO</td> <td>3.7/3.7 SEG</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>AGUA TRIDESTILADA</td> <td></td> <td>104001</td> <td>CADA 4 SEM</td> <td>TIEMPO DE ENFRIAMIENTO</td> <td>15.3/15.3 SEG</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>INDUCTOR P/TEMPLE</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>REFRIGERANTE CONCENTRACION</td> <td>EL VALOR DEL REFRACTOMETRO POR EL FACTOR 2.2-13%</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NIVEL DE POTENCIA</td> <td>40.74%</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>DEMORA DE REFRIGERANTE</td> <td>0.9/0.9 SEG</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>GASTO DE REFRIGERANTE</td> <td>10.40 GPM</td> </tr> </tbody> </table> |                     | No         | NOMBRE                     | DISEÑO                                           | CODIGO | FRECUENCIA | PARÁMETROS | ESPECIF. | 1 | ACUATEMP 115 |  | 207017 | CADA 4 SEM | TIEMPO DE CALENTAMIENTO | 3.7/3.7 SEG | 2 | AGUA TRIDESTILADA |  | 104001 | CADA 4 SEM | TIEMPO DE ENFRIAMIENTO | 15.3/15.3 SEG | 3 | INDUCTOR P/TEMPLE |  |  |  | REFRIGERANTE CONCENTRACION | EL VALOR DEL REFRACTOMETRO POR EL FACTOR 2.2-13% |  |  |  |  |  | NIVEL DE POTENCIA | 40.74% |  |  |  |  |  | DEMORA DE REFRIGERANTE | 0.9/0.9 SEG |  |  |  |  |  | GASTO DE REFRIGERANTE | 10.40 GPM |
| No                                                                                  | NOMBRE                                                                          | DISEÑO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | CODIGO              | FRECUENCIA | PARÁMETROS                 | ESPECIF.                                         |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| 1                                                                                   | ACUATEMP 115                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 207017              | CADA 4 SEM | TIEMPO DE CALENTAMIENTO    | 3.7/3.7 SEG                                      |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| 2                                                                                   | AGUA TRIDESTILADA                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 104001              | CADA 4 SEM | TIEMPO DE ENFRIAMIENTO     | 15.3/15.3 SEG                                    |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| 3                                                                                   | INDUCTOR P/TEMPLE                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                     |            | REFRIGERANTE CONCENTRACION | EL VALOR DEL REFRACTOMETRO POR EL FACTOR 2.2-13% |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
|                                                                                     |                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                     |            | NIVEL DE POTENCIA          | 40.74%                                           |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
|                                                                                     |                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                     |            | DEMORA DE REFRIGERANTE     | 0.9/0.9 SEG                                      |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
|                                                                                     |                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                     |            | GASTO DE REFRIGERANTE      | 10.40 GPM                                        |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| SECUENCIA DE OPERACION                                                              | AJUSTES Y RECOMENDACIONES DE MAQ                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                     |            |                            |                                                  |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| VER INSTRUCTIVO DE MÉTODO DE TRABAJO ESTÁNDAR DIO-296                               | VER INSTRUCTIVO DE CAMBIO DE MODELO, PARA VARRANQUE Y AJUSTE DE LA OPERACIÓN 60 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                     |            |                            |                                                  |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| Partes de Precisión Fundidas y Maquinadas de Alto Valor<br>Agregado                 |                                                                                 | ELABORO:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                     |            |                            |                                                  |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| CÓDIGO: DHP-101-60                                                                  |                                                                                 | REVISO:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                     |            |                            |                                                  |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |
| NIVEL DE REV:                                                                       |                                                                                 | COPIA CONTROLADA No.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                     |            |                            |                                                  |        |            |            |          |   |              |  |        |            |                         |             |   |                   |  |        |            |                        |               |   |                   |  |  |  |                            |                                                  |  |  |  |  |  |                   |        |  |  |  |  |  |                        |             |  |  |  |  |  |                       |           |

## BIBLIOGRAFÍA

- arboldelevas.blogspot.mx. (12 de Septiembre de 2011). *arboldelevas.blogspot.mx*.  
Obtenido de arboldelevas.blogspot.mx: <http://arboldelevas.blogspot.mx/>
- Arias Montoya, L., Portilla, L. M., & Castaño Benjumea, J. C. (Junio de 2008).  
Aplicación de Seis Sigma en las organizaciones. *Scientia Et Technica*, XIV(38),  
265-270.
- Automotive Industry Action Group. (2010). *Measurement Systems Analysis* (4 ed.).  
Chrysler Group LLC.
- Briggs E., Y. R. (2009). *Diseño de un banco de prueba de balanceo dinámico para ser  
usado con fines didácticos en la formación de ingenieros y tecnólogos de la  
U.D.O.-Anzoátegui. Tesis*. Cumaná: Universidad de Oriente Venezuela.
- Browne, R., Mackay, J., & Stefan, S. (1 de Enero de 2007). *Business and Industrial  
Statistics Research Group*. Obtenido de Business and Industrial Statistics  
Research Group Report RR-07-01: [uwaterloo.ca/business-and-industrial-  
statistics-research-group/publication-archives](http://uwaterloo.ca/business-and-industrial-statistics-research-group/publication-archives)
- Browne, R., Mackay, J., & Steiner, S. (19 de Diciembre de 2007). *Business and  
Industrial statistics Research Group*. Obtenido de Business and Industrial  
statistics Research Group Report RR-07-03: [uwaterloo.ca/business-and-  
industrial-statistics-research-group/publication-archives](http://uwaterloo.ca/business-and-industrial-statistics-research-group/publication-archives)
- Correa, N. (Diciembre de 2003). Seis sigma nuevo paradigma para medir la calidad.  
*Mundo Mitutoyo* , 5-7.
- De Mast, J., & Lokkerbol, J. (2012). An Analysis of the Six Sigma DMAIC Method from  
the Perspective of Problem Solving. *International Journal of Production  
Economics*, 604-614.

- García Guerrero, V. M. (2014). *Control electrónico de variación de fase en el árbol de levas para un cabezote de un motor corsa*. Tesis. Quito: Universidad Internacional del Ecuador.
- Gutiérrez Pulido, H. (2010). *Calidad Total y Productividad* (Tercera ed.). México: McGraw Hil. Recuperado el Noviembre de 2016
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma* (Segunda ed.). México: McGraw Hill. Recuperado el Noviembre de 2016
- Kumar, U. D., Crocker, J., Chitra, T., & Saranga, H. (2006). *Reliability and Six Sigma*. New York, Estados Unidos: Springer.
- Lucas, J. M. (2002). *The Essential Six Sigma* (Vol. 35). Milwaukee: Quality Progress. Recuperado el 4 de Noviembre de 2016
- MOTORGIGA. (30 de Mayo de 2016). *www.diccionario.motorgiga.com*. Obtenido de [www.diccionario.motorgiga.com: https://diccionario.motorgiga.com/arbol-de-levas](https://diccionario.motorgiga.com/arbol-de-levas)
- Park, S. H. (2003). *Six Sigma for quality and productivity promotion*. Tokio, Japón: Asian Productivity Organization. Recuperado el 20 de Octubre de 2016
- Pérez López, E., & García Cerdas, M. (2014). Implementación de la metodología DMAIC-Seis Sigma en el envasado de licores en FANAL. *Tecnología en Marcha*, 88-106.
- Pérez Urrego, M. L., Peláez Zuñiga, J. S., & Carrión García, A. (2013). *La capacidad de procesos como métrica de calidad para características cualitativas*. Universidad de Ibagué - Universidad Politécnica de Valencia España. Valencia: Universidad de Ibagué - Universidad Politécnica de Valencia España. Recuperado el 5 de Noviembre de 2016

- Polesky, G. (agosto de 2006). *Curso de preparación para Green Belt en la Metodología Seis Sigma*. Puebla: Universidad de las Americas.
- Pyzdek, T., & Keller, P. (2014). *The Six Sigma Handbook* (4 ed.). United States of America: McGraw-Hill.
- Robert, J. F., & Chase, R. B. (2014). *Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros* (Decimotercera ed.). México D.F.: McGraw Hill / Interamericana editores S.A de C.V. Recuperado el 15 de Octubre de 2016
- Saglimbeni Jarrín, E. V. (2015). *Aplicación de metodología DMAIC (Six Sigma) para la reducción de reproceso de información estadística de control nutricional. Tesis*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Schroeder, R. G., Goldstein, M., & Johnny, R. M. (2011). *Administración de operaciones. Conceptos y casos contemporaneos*. México D.F.: McGraw Hill / Interamericana editores S.A. de C.V. Recuperado el 14 de Octubre de 2016
- Sehgal, S., & Kaushish, D. (2013). A State of Art of Review of DMAIC Approach. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 450-452. Recuperado el 2016
- Seis-Sigma.com. (2002). <http://www.oocities.org/es/>. Recuperado el 13 de Octubre de 2016, de <http://www.oocities.org/es/>: <http://www.oocities.org/es/pedrobonilloramos/af/AF00.htm>
- Shaikh, S. A., & Kazi, J. (Febrero de 2015). A Reviewon Six Sigma (DMAIC) Methodology. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 5, 11-16. Recuperado el 12 de Octubre de 2016
- Sokovic, M., Pavletic, D., & Krulcic, E. (2006). Six Sigma process improvements in automotive parts production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 96-102. Recuperado el 2016

- Srinivasan, K., Muthu, S., Devadasan, S. R., & Sugumaran, C. (2016). Enhancement of sigma level in the manufacturing of furnace nozzle through DMAIC approach of six sigma: a case study. *Production Planning & Control*, 810-822.
- Valles, A., Sánchez, J., Noriega, S., & Gómez Nuñez, B. (2009). Implementation of Six Sigma in a Manufacturing Process: A Case Study. *International Journals of Industrial Engineering*, 171-181. Recuperado el 2016
- Vijay, S. A., & Abdulrahman, I. (2014). REDUCING AND OPTIMIZING THE CICLE TIME OF PATIENTS DISCHARGE PROCESSIN A HOSPITAL USING SIX SIGMA DMAIC APPROACH. *International Journal for Quality Research*, 169-182.