

DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD REAL DE UN PROCESO DE RECTIFICADO SIN CENTROS Y PROPUESTA DE MEJORA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ADMINISTRATIVA

PRESENTA:

ING. BENJAMÍN JAVIER ELIZONDO

DIRECTOR o DIRECTORA DE TESIS

MTRO. AMANDO RIVAS

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO.

MAYO, 2022



SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR Y NORMAL
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CUAUTITLÁN IZCALLI



"2022. Año del Quincentenario de Toluca, Capital del Estado de México".

Cuatitlán Izcalli, Estado de México a 09 de mayo de 2022

TESCI/DIDT/056/V/22

**DIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
COORDINACIÓN DE POSGRADO**

**INGENIERO
BENJAMÍN JAVIER ELIZONDO
PRESENTE**

Por este conducto me permito informarle que puede proceder a la digitalización del Trabajo de Tesis titulado:

"DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD REAL DE UN PROCESO DE RECTIFICADO SIN CENTROS Y PROPUESTA DE MEJORA"

Ya que la comisión encargada de revisar el trabajo que se presenta para efectos de titulación, han dado su autorización conforme a lo estipulado en el Lineamiento para la operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos.

Sin nada más que agregar, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración.



ATENTAMENTE

**LIC. ROCÍO ORTEGA JIMÉNEZ
DEPARTAMENTO DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
COORDINACIÓN DE POSGRADO**



c.c.p. Archivo
Departamento de Titulación
Expediente del alumno



**SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR Y NORMAL
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CUAUTITLÁN IZCALLI**

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a mi madre M. Clelia Elizondo C. por haberme apoyado en todos mis estudios y por todo el esfuerzo que realizo para poder brindarme la educación necesaria que despertó en mí el apetito de conocer y aprender siempre cosas nuevas, también agradecer a mi abuela materna Hermenegilda Camacho T. por haberme acogido en su hogar junto con mi abuelo Antonio Elizondo y darme todas las facilidades para poder realizar mis estudios.

También agradezco a mi Tía Patricia Elizondo quien ha sido como una segunda madre.

Agradezco a mis hermanas por la motivación y el apoyo que me brindaron durante el posgrado.

Un especial agradecimiento a mi Asesor de Tesis el Mtro. Amando Rivas R. por todo el apoyo, la paciencia y el conocimiento compartido durante la elaboración de esta tesis y destacar que es un excelente profesor y amigo.

Quiero agradecer a mi lugar de trabajo por permitirme desarrollar los estudios necesarios para poder corroborar las teorías que en esta tesis se presentan.

Un agradecimiento especial a todos mis maestros, compañeros de clase y todas las personas que no he mencionado pero que de una u otra manera han sido partícipes de esta tesis y que me apoyaron moralmente para la culminación de mis estudios de posgrado.

Agradezco a mi Institución el Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli que ya me había dado la oportunidad de graduarme de licenciatura y ahora nuevamente me da la oportunidad de obtener un título de posgrado como Maestro, sin duda le tengo un cariño muy especial a mi Alma máter.

Agradezco al Gobierno del Estado de México por el apoyo económico obtenido de la beca para estudios de posgrado

Y por último uno de los agradecimientos más especiales es para mi esposa Erika G. López C. quien fue parte importante de la motivación para estudiar el posgrado, gracias por todas las desveladas, las comidas, desayunos preparados y todo el apoyo moral y paciencia que puso para que yo solo me preocupara por mis estudios, este logro también es parte de ella.

“Amo el conocimiento, aprender cosas nuevas es una de las cosas que más me gusta de este paso por la vida”

Índice

Capítulo I. Introducción.	6
Objetivo general.	7
Objetivos específicos.	7
Justificación.....	8
Hipótesis.....	10
Capítulo II. Marco teórico y Estado del arte	12
Historia y Antecedentes de la Calidad en la Manufactura de los Productos.....	12
El rectificado de piezas.	13
La calidad y el control estadísticos de los proceso.	17
¿Qué es el control estadístico de la calidad?	19
La variabilidad de los procesos	19
Tipos de distribuciones estadísticas.	23
Distribuciones discretas	23
Uniforme discreta	23
Binominal	23
Distribución hipergeométrica (N, R, n).....	24
Distribución geométrica (p).....	24
Distribución binomial negativa (r, p)	24
Distribución Poisson (λ).....	24
Distribuciones Continuas	24
Distribución uniforme o rectangular (a, b)	24
Distribución normal (μ , σ).....	25
Distribución lognormal (μ , σ)	25
Distribución logística (a, b).....	26
Distribución gamma (a, p)	26
Distribución ji-cuadrado (n)	26
Distribución t de Student (n)	27
La desviación estándar en la Calidad	27
Gráficos de control.....	29
Graficas de control para variables.....	32
Graficas R.....	32
Graficas \bar{X}	33
Análisis del Sistema de Medición.	34

Repetibilidad.....	36
Reproducibilidad.....	36
Método ANOVA para Gage R&R.....	37
Gage R&R.	37
Los índices CP y Cpk.....	38
Índice Cp.....	38
Índice Cpk.....	40
Capítulo III. Metodología.....	41
Estudio R&R.	41
Estudio de distribución.....	42
Estudio de CP Y CPK.	42
Revisión de propuestas de mejora.....	42
Capítulo IV. Desarrollo.....	43
Contexto del estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad.....	45
Desarrollo del Estudio R&R.	48
Recolección de datos Gauge R&R.....	51
Resultados del primer estudio R&R.....	53
Nuevo estudio R&R aplicando condiciones.....	55
Análisis de la distribución estadística de los Datos.	59
Analizando el Proceso de Rectificado.....	62
Desarrollo del estudio Cp y Cpk.	64
Estudio Cp y Cpk con tolerancias ampliadas.	67
Capítulo V. Conclusiones y resultados.	70
Bibliografía	77
Tablas y Figuras.	77

Capítulo I. Introducción.

México es un país en pleno desarrollo industrial, cada día demanda más personal cualificado que pueda proporcionar soluciones reales a los problemas con los que se enfrentan las industrias día con día, en tal tenor la industria en México está entrando a una etapa donde la generación de Ingenieros egresados en los años 80's está en procesos de jubilación o retiro de la Industria Manufacturera los a cuales a su paso fueron los que más desarrollo técnico aportaron a las organizaciones, hoy en día el panorama puede resultar desalentador pues bien "Lamentable-mente, hoy se apunta que existe un notable desfase entre los conocimientos de los graduados de ingeniería y lo que necesita el país. Eso es grave, porque de los ingenieros y de la educación en ingeniería depende en gran parte el desarrollo de nuestra nación. México requiere de ingenieros flexibles y competitivos, que además tengan resistencia al cambio por el cambio" Vázquez R. (2012).

Con el presente trabajo de investigación se pretende aportar conocimiento teórico-práctico con un enfoque técnico para validar el proceso de rectificado sin centros de una flecha (eje rotatorio) para la fabricación de motores de alto flujo, usados en la industria electrodoméstica, se pretende asentar los métodos necesarios para que dicho proceso demuestre el cumplimiento de la habilidad y capacidad con el uso de herramientas estadísticas de tal modo que pueda mantener la especificaciones en los diámetros donde encajan la chumacera y el balero respectivamente validando así la calidad de las piezas entregadas al cliente.

Se muestra el trabajo como un antecedente de investigación importante debido a que no hay mucho material bibliográfico que aporte conocimiento técnico acerca de este tema.

Objetivo general.

Mejorar los procesos de fabricación de la flecha (eje rotatorio del motor) con número de parte 25-1225-02-5 para lograr un índice de Cpk mínimo de 1.0 superando así el estado actual con promedio de 0.394 de acuerdo a los datos obtenidos en el 2° trimestre del año 2020 lo que implicaría validar que el sistema de medición sea el correcto, que realmente las máquinas de rectificado tengan la habilidad a través del tiempo de mantener el cumplimiento de la especificación actual y determinar si el proceso de ajuste tiene relación directa con los resultados en la variación de las medidas la cual tiene como sede de fabricación la empresa con el nombre de Koblenz S.A. de C.V. con sede en el Estado de México, México.

Objetivos específicos.

1.- Determinar que el sistema de medición usado para revisar las dimensiones del eje rotatorio en el diámetro de la chumacera, balero y cuerpo es el adecuado de tal modo que cumpla máximo con una variación del 10% y con un número de distinción de categorías ≤ 5 , si no cumple averiguar cuál es la causa.

2.- Identificar si el comportamiento de los datos en las mediciones cumple con una distribución normal por lo tanto deben tener un valor $P > 0.05$, si no cumple examinar cuál es la causa.

3.- Determinar la capacidad real del proceso de acuerdo a los índices Cp y Cpk para las dimensiones en el diámetro de la chumacera, de no cumplir averiguar la causa.

4.- Proponer acciones de Mejora para lograr un índice Cpk y Cp mínimo de 1.0,

Justificación.

El proceso de rectificado es de suma importancia para muchas Industria de Manufactura pues es una de los procesos más esenciales ya que tiene la finalidad de corregir imperfecciones para mejorar el acabado y la forma de una pieza. Los procesos de rectificado son sobretodo imprescindibles en la fabricación de motores, frenos, piezas que tiene fricción o rozamiento entre sí, etc., pues es capaz de dejar acabados sumamente finos y de dimensiones exactas en la superficie de la pieza. En la organización Koblenz S.A. de C.V. el proceso de rectificado es el encargado de dar la dimensión final a la flecha antes mencionada la cual es utilizada para fabricar los motores de las aspiradoras el volumen actual de flechas fabricadas tiene un promedio de 60,125 piezas por mes lo que representa que en el procesos de manufactura se tengan 2 líneas de ensamble de motor una proceso manual y otra con una línea de ensamble automática, además 3 líneas de ensamble manual de aspiradoras estas cinco líneas juntas representa un total de 91 personas aproximadamente según el volumen de demanda. Si las piezas no cumplieran con las especificaciones del producto implicaría realizar paros de línea y no cumplir con los compromisos de entrega. Es esencial para que el producto cumpla su ciclo de vida que las dimensiones en los diámetros de las zonas antes mencionadas cumplan con las especificadas de lo contrario esto puede mermar el tiempo de vida del motor hasta un 20% lo que daría

como resultado que el consumidor final no pueda hacer uso del producto en el tiempo completo de vida mermando así a durabilidad y la satisfacción.

Por 4 años consecutivos en la organización el índice Cpk y Cp del proceso de rectificado no ha alcanzado un puntaje de 1.0 esto considerando la metodología con la que actualmente se calcula dicho puntaje, esto es un indicador de que se están produciendo flechas “fuera de especificación” aunque realmente no se tiene la certeza de que esto realmente esté ocurriendo, la especificación actual para el diámetro en la zona de la chumacera es de 0.2499” a 0.2502”, para el diámetro donde se coloca el balero es de 0.3144” a 0.3147” y por último la especificación para el diámetro del cuerpo del eje debe ser de 0.3150” a 0.3153” las consecuencias de no cumplir con la especificación de cada diámetro varían según sea el caso por ejemplo: si no se cumple con el diámetro máximo de 0.2502” la chumacera no puede ser colocada en la flecha por lo que el ensamble tiene que ser desechado por completo el cual tiene un costo a la fecha del presente trabajo de \$ 30.92 MXN cada uno, el promedio mensual desechado por esta condición de acuerdo al Cpk obtenido en los gráficos de control sería de 7,059 piezas lo que representaría un ahorro de \$215,000.00 mxn mensuales la misma condición ocurre para flecha con el diámetro mayor a lo especificado en la zona del balero, por otro lado si el diámetro es menor 0.2499” puede ocasionar un desgaste prematuro en la chumacera mermando el tiempo de vida del producto, aunque este hecho es muy complicado de medir ya que se tienen que realizar una gran cantidad de pruebas consideradas destructivas, este hecho se conoce porque el departamento de Ingeniería del Producto ha proporcionado dicha información, aunque esta dato no sea justificante para el estudio en cuestión el hecho de no cumplir con el índice de Cpk

requerido genera la duda de ¿Porque el procesos de rectificando en zona de chumacera no puede alcanzar el índice de Cpk mínimo de 1.0? es aquí donde se centra el corazón de la investigación presente.

Hipótesis.

De acuerdo con el libro Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma de Humberto G. y Román de la Vara un índice de Cpk mayor a 1.25 en un proceso ya existente (viejo) se puede considerar como un proceso que es capaz de producir la mayor parte del tiempo piezas buenas sin embargo por otro lado un índice de Cpk de 1.45 es lo mínimo necesario para procesos nuevos, por lo tanto se busca alcanzar un objetivo mínimo de 1.0 de índice Cpk esto considerando que el actual procedimiento de la organización así lo requiere para garantizar la calidad de las piezas sujetas al sistema de control estadístico, como se había indicado el proceso actual de rectificando de las piezas tiene un promedio de 0.39 si cerramos esta cantidad a 0.4 para tomar como referencia la tabla 1 estaríamos produciendo aproximadamente 115,069.732 piezas fuera de especificación por cada millón de piezas fabricadas.

Tabla 1. Los índices Cp, Cpi y Cps en términos de la cantidad de piezas malas.

VALOR DEL ÍNDICE (CORTO PLAZO)	PROCESO CON DOBLE ESPECIFICACIÓN (ÍNDICE C_p)		CON REFERENCIA A UNA SOLA ESPECIFICACIÓN (C_{pi} , C_{ps} , C_{pk})	
	% FUERA DE LAS DOS ESPECIFICACIONES	PARTES POR MILLÓN FUERA (PPM)	% FUERA DE UNA ESPECIFICACIÓN	PARTES POR MILLÓN FUERA (PPM)
0.2	54.8506%	548 506.130	27.4253%	274 253.065
0.3	36.8120%	368 120.183	18.4060%	184 060.092
0.4	23.0139%	230 139.463	11.5070%	115 069.732
0.5	13.3614%	133 614.458	6.6807%	66 807.229
0.6	7.1861%	71 860.531	3.5930%	35 930.266
0.7	3.5729%	35 728.715	1.7864%	17 864.357
0.8	1.6395%	16 395.058	0.8198%	8 197.529
0.9	0.6934%	6 934.046	0.3467%	3 467.023

Nota. Recuperado de Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma. Derechos reservados 2009 por la editorial McGraw-Hill/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Se puede entender con el antecedente mostrado el planteamiento de las siguientes hipótesis;

1. El sistema de medición no es el adecuado para una tolerancia de 0.0003" (diezmilésimas) por lo tanto presenta una variación general mayor al 10%. La mayor variación debería presentarse en el resultado de las dimensiones y no con el instrumento de medición o las personas que realizan las mediciones.
2. El análisis de capacidad de proceso se está realizando con datos que no cumplen con la condición de normalidad, esto ocurre si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia de 0.05, si es mayor se puede concluir que los datos siguen una distribución normal.
3. El uso de un micrómetro digital con resolución de 0.00005" (cienmilésimas) no es suficiente para obtener dimensiones con menor variación de tal modo que afecta la calidad y veracidad de los datos por lo tanto el uso de un micrómetro con una resolución de 0.00001" garantizara una distribución normal en los datos.
4. El índice Cpk del diámetro para la chumacera no llega a 1.0 porque aunque se asegure que el sistema de medición y la recolección de los datos es correcta la máquina para el rectificado en las condiciones actuales no tiene la habilidad para mantener la especificación actual por lo tanto las especificación debe modificarse de acuerdo a los que el proceso es capaz así poder cumplir con las especificaciones.

Capítulo II. Marco teórico y Estado del arte

Historia y Antecedentes de la Calidad en la Manufactura de los

Productos.

Empecemos por entender el concepto de Calidad, pues bien la *American Society for Quality Control* define el termino como “la totalidad de los rasgos y características de un producto o servicio que se sustenta en su habilidad para satisfacer las necesidades establecidas o implícitas” (Carro Roberto,2016), en este contexto veamos que la calidad tiene su origen desde que la actividad humana a existido pues bien toda creación del ser humano puede ser juzgada por la eficacia o resultado para lo que fue creado, en otras palabras que realmente el objeto creado cumple plenamente con su función o para lo que fue destinado, se puede hacer conjetura de esto porque la historia esta re plaga de referencias, un ejemplo de ello es que en el año 2.150 antes de Cristo, el código de Hammurabi hace referencia a la calidad de construcción de las casas cuando dice “si un albañil ha construido una casa y, no siendo está suficientemente sólida, se hunde y mata a sus ocupantes, el albañil deberá ser ejecutado” en otra parte de la historia y el cual puede estar considerado como el tratado más antiguo de calidad es un garbado en la tumba de Rekh-Mi-Re descubierta en Tebas, Egipto aproximadamente en el año 1.450 a. c. en dicho grabado se describe como un inspector egipcio procede a comprobar la perpendicularidad de un bloque de piedra con ayuda de una cuerda y bajo la atenta mirada de un cantero (se ha descubierto que los aztecas de América Central procedían de forma similar).

Como se puede observar las inspecciones de calidad son inherentes a toda creación humana tal vez no se haya visualizado en la antigüedad como el concepto moderno

que hoy conocemos sin embargo ha estado presente durante toda la existencia de la humanidad.

Se pueden identificar 9 importantes hitos durante la historia de la Calidad ya más entendido el término como un concepto, los cuales son:

1. La Normalización de Piezas.
2. La Producción en Cadena.
3. Primera Definición de Calidad: Conformidad con las Especificaciones
4. Departamentos de Inspección.
5. El Control Estadístico del Proceso.
6. Aseguramiento de la Calidad.
7. La Calidad en Japón: Juran y Deming.
8. Gestión de la Calidad Total.
9. Modelos de Excelencia en la Gestión.

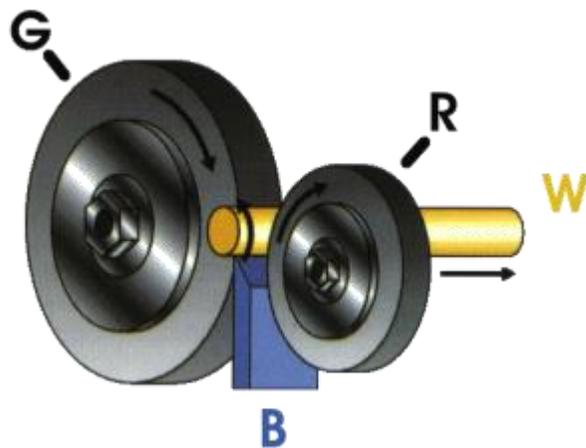
En el presente trabajo nos enfocaremos en el Control Estadísticos de los Procesos, este resulta particularmente importante dentro de la industria de manufactura puesta enfocado a reducir la variación de los procesos de fabricación lo que ayuda a que las variables discretas y continuas de las características de un producto sean más consistentes a través del tiempo logrando así que su calidad se apege a lo deseado por el cliente.

El rectificado de piezas.

El rectificado es el procesos mediante el cual se da un acabado a la superficie cilíndrica de una pieza esto tiene como objetivo que la superficie tenga un diámetro

ideal y una rugosidad con calidad superior, esto se logra a través de maquinaria que posee muelas abrasivas las cuales se encargan de desbastar el material girando mecánicamente entorno del diámetro de la piezas a la cual se le quiere dar el acabado. Con el rectificado sin centros la pieza no se sujeta mecánicamente para arrastrar la pieza ver figura 1, esta pieza (W) esta soportada por una cuchilla de trabajo (B) justo en medio de la rueda de regulación (R) y la llamada muela (G), la rueda de regulación impulsa la pieza y la rueda muela desbasta el material para dar el acabado y diámetro deseado.

Figura 1. Proceso de rectificado sin centros.



Nota. La imagen representa el modelo de un proceso de rectificado sin centros.

Tomado de *Rectyafil rectificadores sin centros*, <http://www.rectificadoindustrial.es/rectificado-sin-centros/>

Existen dos tipos de rectificadores sin centros, rectificado por alimentación directa y rectificado de alimentación, mientras que en el primero las piezas son alimentadas automáticamente en el sistema de rectificado en el segundo se realiza de forma manual por parte del operador. Las piezas pueden presentar varios diámetros para rectificado

dado esto las muelas pueden ser adaptadas con figuras poco complejas de tal modo que se pueda realizar el rectificado de la pieza de una sola vez, del mismo modo permite que las zonas que no son necesarias rectificar puedan permanecer separadas de dichas rudas y no sufran desbaste alguno. La operación de rectificado sin centros resulta la mejor opción para dar un excelente acabado a las piezas tanto en producción como en recuperación de materiales que poseen características que logren ser reducidas en diámetro.

Muchas son las piezas que pueden ser procesadas mediante el rectificado sin centros como por ejemplo; rodamientos, pernos, bolas, ejes, árboles de levas, varillas de carburo, ejes de compresores, rodillos de copia, cilindros, taladros, ejes de engranajes y cubos, agujas de inyectores, émbolos y cuerpos de inyectores, aisladores, ejes de motor, agujas pasadores, pasadores de pistón, pivotes, rotores, ejes cigüeñales pequeños, etc.

Las máquinas y materiales del procesos de rectificado pueden variar según la necesidad de las piezas a procesar, sin embargo la diferencia en los acabados y diámetros de las piezas radica en el tipo de muela abrasiva que se utiliza en el procesos de desbaste un buen material abrasivo debe presentar ciertas propiedades que garanticen su correcta funcionalidad para lograr un buen rectificado, por ejemplo;

- a) Duros para mantener los filos cortantes.
- b) Estables a las altas temperaturas de contacto
- c) Estables químicamente para evitar a esas temperaturas elevadas una reacción química con el aire o con el material en contacto.

Hoy en día estos materiales abrasivos han sido remplazados por productos sintéticos de mejores y más controlables propiedades físicas y mecánicas con la finalidad de buscar el mejor rendimiento para el trabajo asignado.

Según su dureza dichos materiales pueden clasificarse por sus durezas relativas y se indican en escala Mohs, por su capacidad de rayar uno al otro. Se asigna el número 10 al más duro, que es el diamante, llegando a 1 para el talco. En cambio, la escala Knoop establece una medida objetiva de dureza por la resistencia a la penetración de un buril de diamante piramidal lapidado con precisión, bajo una carga preestablecida de 100 grs. La dureza Mohs se indica con el símbolo ("D"), mientras que la dureza Knoop con ("K100").

Entre los tipos de abrasivos naturales podemos encontrar;

- Corindón Natural
- Esmeril
- Granate

Y entre los materiales artificialmente creados, podemos diferenciar 3 grupos;

- Corindones artificiales:
 - OxAl común Gris
 - OxAl puro o blanco
 - OxAl monocristalino
 - OxAl rubí y rosado
 - Oxido de zirconio
- Carburo de silicio

- Verde
- Negro
- Super abrasivos diamante y nitruro de boro (borazón)

Como se ve, la gran variedad de tipos de corindones artificiales da lugar a una diversidad de campos de aplicaciones para los cuales los fabricantes dan sus recomendaciones.

La calidad y el control estadísticos de los proceso.

El control estadístico de los procesos tiene una estrecha relación con el control de la calidad en las organizaciones, históricamente esta ha sido una de las formas más prácticas de reducir la variabilidad que presentan los procesos y así poder garantizar que lo se le entrega al cliente cumple con lo necesario para poder satisfacer sus necesidades.

Walter A. Shewhart (1891 -1967) fue un físico, ingeniero y estadístico estadounidense, conocido como el padre del control estadístico de la calidad. Creó las bases para el gráfico de control y el concepto de un estado de control estadístico por medio de experimentos diseñados cuidadosamente. Su trabajo más convencional lo llevó a formular la idea estadística de intervalos de tolerancia, los cuales se utilizaron para comenzar a medir si los productos, una vez producidos, se ajustaban a los requerimientos y si el proceso de fabricación estaba fuera de control o controlado. Este modelo de control estadístico se utiliza hasta el día de hoy. Para Shewhart “Si tuviéramos que hablar inteligente acerca de la calidad de una cosa o de un producto, tendríamos que tener en mente una idea clara de lo que es calidad. Ha sido suficiente

con indicar que hay dos aspectos comunes de la calidad; el primero tiene que ver con la consideración que la calidad de una cosa es algo totalmente independiente de la naturaleza del ser humano. La segunda tiene que ver con lo que nosotros sentimos, pensamos y que es resultado de la realidad objetiva.”

En otras palabras lo que nos quiere decir Shewhart es que el primer aspecto de la calidad es lo tangible del producto que tanto cumple con los requisitos un plano, de funcionamiento de color materiales etc. es todo aquello que se puede medir de alguna forma y el segundo aspecto hace referencia a como el usuario percibe o considera la calidad del producto de acuerdo a la satisfacción que obtiene al cumplir sus necesidades incluso de la percepción del costo beneficio que obtiene del producto o servicio. En este contexto una de las mejores formas de evaluar la calidad en los productos es conociendo la variabilidad que presentan las características críticas al momento de ser elaborados y para ello existe el control estadístico de la calidad.

Menciona Edwards Deming (1988), probablemente considerado por todos el “padre” de la calidad en una de sus últimos trabajos que hizo de este concepto de calidad:

“Los problemas inherentes en tratar de definir la calidad de un producto, casi de cualquier producto, fueron establecidos por el maestro Walter Shewhart. La dificultad en definir calidad es traducir las necesidades futuras de los usuarios en características medibles, solo así un producto puede ser diseñado y fabricado para dar satisfacción a un precio que el cliente pagará. Esto no es fácil, y tan pronto como uno se siente exitoso, encuentra rápidamente que las necesidades del cliente han cambiado y que la

competencia ha mejorado, hay nuevos materiales para trabajar, algunos mejores que los anteriores, otros peores, otros más baratos, otros más caros ...”

Según sean las necesidades del cliente optara por comprar una u otra cosa, lo que debe ser indispensable es que indistintamente de lo que decida debe obtener un producto que cumpla con la calidad para lo que fue creado y la única forma de saberlo es midiendo sus características.

¿Qué es el control estadístico de la calidad?

El Control Estadístico de la Calidad es el estudio de diferentes técnicas estadísticas a procesos industriales, administrativos y/o servicios con la meta de comprobar si todas y cada una de las partes del proceso o servicio cumplen con las exigencias de calidad y así ayudar a cumplirlas. Entendiendo por calidad de un producto o servicio como su adecuación para ser usado.

La variabilidad de los procesos

La mayor dificultad para proporcionar productos o servicios de calidad perfecta es la variabilidad inherente a cualquier proceso de fabricación o de prestación de servicios. El principal objetivo del control de calidad será reducir sistemáticamente la variabilidad en productos y servicios. Para ello es necesario, primero identificar las causas que provocan variabilidad y posteriormente eliminarlas del proceso de fabricación. Diremos que un proceso está bajo control o en estado de control cuando la característica de calidad observada en el proceso varía de forma estable alrededor de un valor medio fijo.

Las causas de variabilidad se pueden clasificar como:

- **Causas comunes:** (o aleatorias) afectan a todo el proceso de fabricación. Suelen ser muchas pero cada una de ellas tiene muy poca influencia en la variabilidad total. Se observan cuando el proceso está bajo control. Resultan de cambios inherentes al proceso, (ej. variaciones de temperatura y humedad en el ambiente...)

- **Causas especiales o asignables:** hacen que el proceso abandone su estado de control. Suelen ser pocas, pero sus efectos son muy importantes. Aparecen esporádicamente afectando alguna fase concreta del proceso. El tratamiento adecuado, incluye su detección y eliminación del sistema. (ej. ajuste incorrecto de una máquina, errores humanos...).

El objetivo del Control Estadístico de la Calidad es detectar rápidamente la ocurrencia debida a causas asignables e investigar las causas que la han producido para eliminarlas.

En la tabla no. 2 podemos observar algunas otras formas como se le puede conocer a estos 2 conceptos;

Tabla 2. Otras formas conocidas de llamar a las causas comunes y especiales.

Tipo de variación	Sinónimos
Causa común	Causa probable Causa no asignable Ruido Patrón natural
Causa especial	Causa asignable Señal Patrón no natural

Resulta fundamental poder identificar las causas que están afectando o causando la variabilidad del proceso, ya que conociendo esto podemos atacar el problema que esté

haciendo que nuestro proceso no cumpla con la calidad deseada a continuación se presentan una lista con ejemplos de ambos casos.

Causas Comunes

- Procedimientos inapropiados.
- Pobre diseño.
- Pobre mantenimiento de máquinas
- Carencia de procedimientos estándares de operación claramente definidos.
- Pobres condiciones de trabajo, por ejemplo, iluminación, ruido, polvo, temperatura, ventilación.
- Materia prima subestimar.
- Aseguramiento del error.
- Error en el control de calidad.
- Vibración en procesos industriales.
- Temperatura y humedad ambiental.
- Desgaste y roturas normales.
- Variabilidad en los ajustes.
- Tiempo de respuesta de los computadores.

Causas Especiales

- Pobre ajuste del equipo.
- Operador se queda dormido.
- Controladores defectuosos.
- Malfuncionamiento de las máquinas.
- Malfuncionamiento de los computadores.
- Lote de materia prima de mala calidad.
- Variaciones de energía.
- Alta demanda de cuidados médicos por los ancianos.
- Tráfico anormal (fraude de clicks) en los avisos de internet.
- Tiempo de duración de las pruebas de laboratorio extremadamente grandes debido al cambio a un nuevo sistema de computadores.
- Ausencia del operador.

Cuando las muestras de un conjunto de datos presentan una variación de una con otra y forman un patrón que es estable es llamado distribución, estas distribuciones pueden diferir en la medida de la tendencia central, variación forma o cualquier

combinación de estas. Cuando solo existen causas de variación naturales las salidas del proceso forman una distribución que es estable a través del tiempo y además es predecible (ver figura 2), sin embargo si se presentan causas de variación asignables, la salida de los procesos no es estable a través del tiempo y por ende no se puede predecir su comportamiento (ver figura 3).

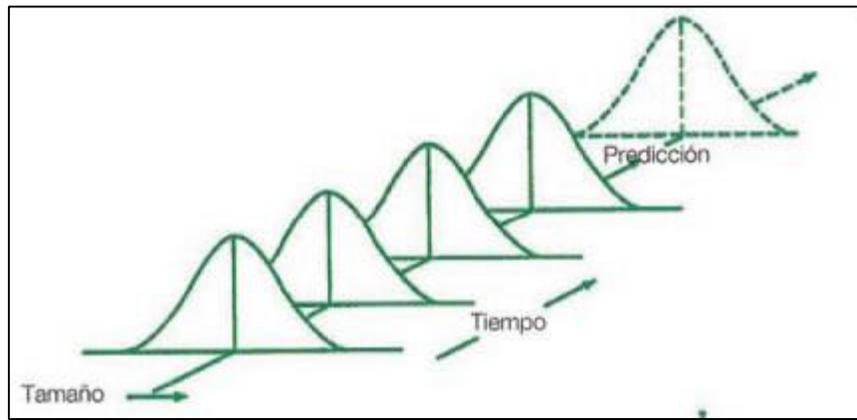


Figura 2. Distribución Normal de un proceso con variaciones naturales.

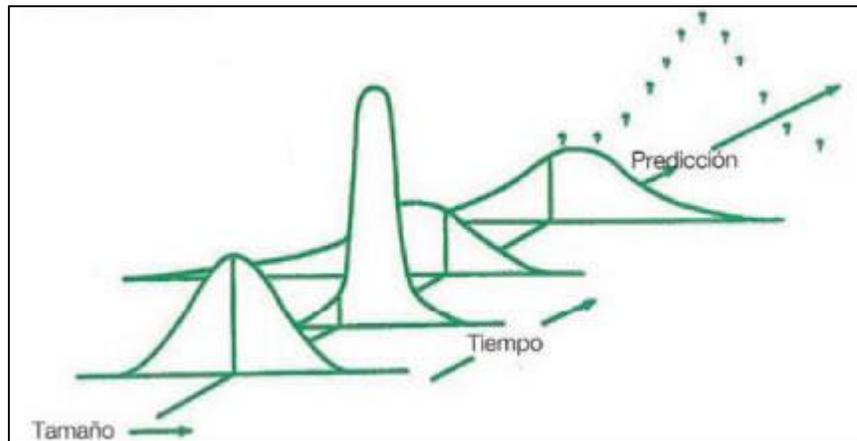


Figura 3. Representación gráfica de causas de variación asignables en un proceso.

Lo anterior se puede observar en el proceso de rectificado sin centros, en el caso de estudio se evalúa el diámetro de la flecha en la posición donde se inserta la flecha, este diámetro como se ha mencionado previamente posee un rango muy cerrado que va de 0.2499" a 0.2502" diezmilésimas de pulgada esto quiere decir que la media objetivo del proceso debería ser de 0.25005" y los valores de las piezas debieran distribuirse equitativamente a los costados, esto siempre y cuando como se menciona la variación del proceso sea natural y no posea causas asignables, más adelante comprobaremos la distribución que presenta el proceso de rectificado para validar este hecho.

Tipos de distribuciones estadísticas.

Parte importante del trabajo de investigación es determinar qué tipo de distribución están siguiendo los datos o los valores recolectados en el diámetro de la flecha, con esto se puede determinar que el cálculo del Cpk y Cp que se está realizando es correcto. A continuación se revisan las diferentes tipos de distribución existentes.

Distribuciones discretas

Uniforme discreta

La distribución uniforme discreta describe el comportamiento de una variable discreta que puede tomar n valores distintos con la misma probabilidad cada uno de ellos.

Binominal

La distribución binomial es una distribución discreta muy importante que surge en muchas aplicaciones bioestadísticas. Fue obtenida por Jakob Bernoulli (1654-1705) y publicada en su obra póstuma *Ars Conjectandi* en 1713.

Distribución hipergeométrica (N, R, n)

La distribución hipergeométrica suele aparecer en procesos muestrales sin reemplazo, en los que se investiga la presencia o ausencia de cierta característica.

Distribución geométrica (p)

Supóngase que se efectúa repetidamente un experimento o prueba, que las repeticiones son independientes y que se está interesado en la ocurrencia o no de un suceso al que se refiere como “éxito”, siendo la probabilidad de este suceso p .

Distribución binomial negativa (r, p)

Una generalización obvia de la distribución geométrica aparece si se supone que un experimento se continúa hasta que un determinado suceso, de probabilidad p , ocurre por r -ésima vez.

Distribución Poisson (λ)

La distribución de Poisson debe su nombre al matemático francés Simeón Denis Poisson (1781-1840), aunque ya había sido introducida en 1718 por Abraham De Moivre (1667-1754) como una forma límite de la distribución binomial que surge cuando se observa un evento raro después de un número grande de repeticiones.

Distribuciones Continuas**Distribución uniforme o rectangular (a, b)**

La distribución uniforme es útil para describir una variable aleatoria con probabilidad constante sobre el intervalo (a, b) en el que está definida y se denota por $U(a, b)$. También es conocida con el nombre de distribución rectangular por el aspecto de su función de densidad.

Distribución normal (μ , σ)

La distribución normal es, sin duda, la distribución de probabilidad más importante del Cálculo de probabilidades y de la Estadística. Fue descubierta, como aproximación de la distribución binomial, por Abraham De Moivre (1667-1754) y publicada en 1733 en su libro *The Doctrine of Chances*; estos resultados fueron ampliados por Pierre-Simón Laplace (1749-1827), quién también realizó aportaciones importantes. En 1809, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) publicó un libro sobre el movimiento de los cuerpos celestes donde asumía errores normales, por este motivo esta distribución también es conocida como distribución Gaussiana.

La importancia de la distribución normal queda totalmente consolidada por ser la distribución límite de numerosas variables aleatorias, discretas y continuas, como se demuestra a través de los teoremas centrales del límite. Las consecuencias de estos teoremas implican la casi universal presencia de la distribución normal en todos los campos de las ciencias empíricas: biología, medicina, psicología, física, economía, etc. En particular, muchas medidas de datos continuos en medicina y en biología (talla, presión arterial, etc.) se aproximan a la distribución normal.

Distribución lognormal (μ , σ)

La variable resultante de aplicar la función exponencial a una variable que se distribuye normal con media μ y desviación estándar σ , sigue una distribución lognormal con parámetros μ (escala) y σ (forma).

Distribución logística (a, b)

Pierre François Verhulst (1804-1849) describió por primera vez la curva logística en un trabajo, publicado en 1845, que versaba sobre las investigaciones matemáticas en las leyes que gobiernan el crecimiento de la población.

La distribución logística se utiliza en el estudio del crecimiento temporal de variables, en particular, demográficas. En biología se ha aplicado, por ejemplo, para modelar el crecimiento de células de levadura, y para representar curvas de dosis-respuesta en bioensayos.

Distribución gamma (a, p)

La distribución gamma se puede caracterizar del modo siguiente: si se está interesado en la ocurrencia de un evento generado por un proceso de Poisson de media λ , la variable que mide el tiempo transcurrido hasta obtener n ocurrencias del evento sigue una distribución gamma con parámetros $a = n \lambda$ (escala) y $p = n$ (forma). Se denota por $\text{Gamma}(a, p)$.

Por ejemplo, la distribución gamma aparece cuando se realiza el estudio de la duración de elementos físicos (tiempo de vida).

Distribución ji-cuadrado (n)

Un caso especial y muy importante de la distribución gamma se obtiene cuando $a = 1/2$ y $p=n/2$, y es conocida por el nombre de distribución ji-cuadrado de Pearson con n grados de libertad (se denota por X_n^2). Es la distribución que sigue la suma de los cuadrados de n variables independientes e idénticamente distribuidas según una distribución normal estándar, $N(0,1)$.

Se emplea, entre otras muchas aplicaciones, para realizar la prueba de hipótesis de homogeneidad, de independencia o la prueba de bondad de ajuste (todas ellas denominadas pruebas ji-cuadrado) y para determinar los límites de confianza de la varianza muestral de una población normal.

Distribución t de Student (n)

Esta distribución fue propuesta y tabulada por William Sealy Gosset (1876-1937), más conocido por el seudónimo de Student, como resultado de un estudio sobre la estimación de la media cuando el tamaño de muestra es pequeño, estos resultados fueron publicados en 1908 en el artículo The Probable Error of a Mean.

La distribución t de Student queda completamente definida por medio de sus grados de libertad, n , y se denota por t_n . Surge cuando se plantea estudiar el cociente entre una variable aleatoria con distribución normal estándar y la raíz cuadrada del cociente entre una variable aleatoria con distribución ji-cuadrado y sus grados de libertad (n), siendo las dos variables independientes.

La desviación estándar en la Calidad

La desviación estándar (σ) es un indicador estadístico o bien una medida de dispersión esencial para la calidad, pues con este podemos conocer que tan desviados están las características críticas de un producto del valor medio que deberían tener, en otras palabras podríamos conocer que tanta variación está presentando el proceso del valor central, es de mucha importancia en la estadística descriptiva y de gran utilidad.

Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Junto con este valor, la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los

datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable. Se caracteriza por ser el estadígrafo de mayor uso en la actualidad. Se obtiene mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum ni (Y_i - X)^2}{N}} \quad (1)$$

La desviación estándar es un indicador en extremo valioso con muchas aplicaciones. Por ejemplo, los estadísticos saben que cuando un conjunto de datos se distribuye de manera “normal”, el 68% de las observaciones de la distribución tiene un valor que se encuentra a menos de una desviación estándar de la media. También saben que el 96% de todas las observaciones tiene un valor no es mayor a la media más o menos dos desviaciones estándar, se puede ver en la figura 4.

La desviación estándar de una población es normalmente representada por la letra griega (sigma), cuando se calcula sobre la base de toda la población; por la letra s (minúscula) cuando se infiere de una muestra; y por la letra S (mayúscula) cuando simplemente corresponde a la desviación estándar de una muestra.

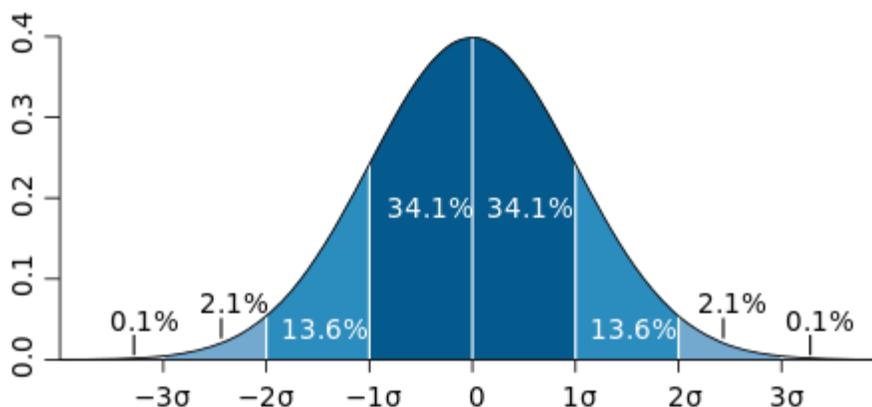


Figura 4. Representación gráfica de la posición de la posición de las desviaciones estándar en la campana de Gauss.

Gráficos de control

Las gráficas de control son representaciones gráficas del comportamiento de un proceso con ellas podemos observar y determinar si las variaciones son anormales, con ello se puede medir y representar la característica crítica de calidad extraída de la muestra, es un diagrama ordenado por tiempos, esto quiere decir que las muestras se obtienen en diferentes horas del día de trabajo y se van registrando los valores obtenidos para determinar un promedio y posteriormente anotarlo o representarlo en la gráfica, estos gráficos poseen una línea central conocida como valor nominal o línea central, que generalmente es el objetivo del valor que se desea alcanzar en la característica de calidad. Los límites de control se sustentan para determinar si es necesario realizar una acción para corregir la variación fuera de especificación de las piezas en cuestión. El valor más grande representa el acotamiento de control superior (UCL) (*del inglés, upper control limit*) y el valor más pequeño representa el acotamiento de control inferior (LCL) (*del inglés, lower control limit*). Estos valores suelen ser más

cerrados que los Límites de control de Especificación ya que sirven para verificar que la característica medir no se salga por los valores especificados si no siempre se mantenga dentro de los controles, ya que al existir un punto fuera de especificación en las muestras recolectadas funcionan para encender las alarmas de que algo en el proceso no está funcionando correctamente. En la imagen de abajo podemos observar la representación de una Gráfica de Control.



Figura 5. Representación de una gráfica de control para medir la variación de los pesos en una pieza cualquiera.

Las Gráficas de Control no son herramientas infalibles a la hora de determinar los cambios en la distribución o asegurar la calidad de los procesos pues están basadas en muestreos aleatorios o distribuciones de muestreo, en esta condición se pueden presentar 2 tipos de errores comunes:

1. **El error de “tipo I”** (rechazar un lote de buena calidad): este sucede cuando el analista o empleado obtiene la conclusión de que el proceso está fuera de control esto determinado por un resultado de muestra ubicado fuera de los acotamientos de control, sin embargo se trataba de un efecto puramente aleatorio.
2. **El error de “tipo II”** (aceptar un lote de mala calidad): este sucede cuando el analista o empleado determinan que el proceso está bajo control y que solo hay discrepancias aleatorias, pero el proceso en realidad está fuera de control.

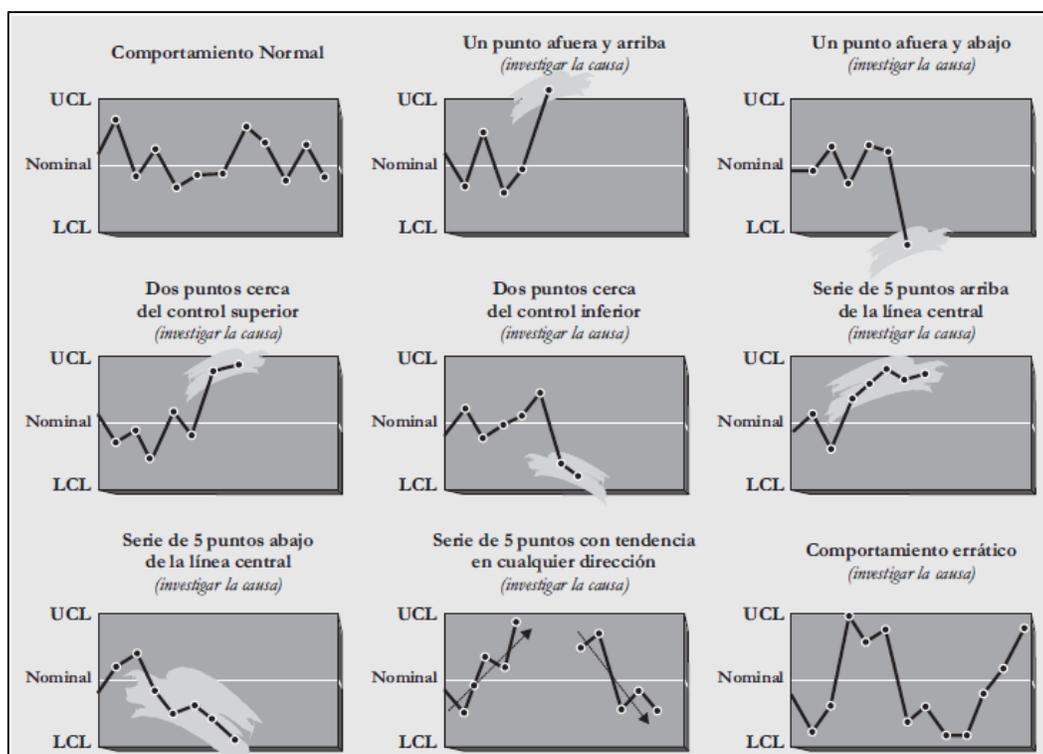


Figura 6. Representación gráfica de procesos que tienen situaciones anormales en el comportamiento de las muestra en el comportamiento de las muestras. Imagen replicada del artículo Control Estadístico de los Procesos, Autores; Roberto C. Paz & Daniel G. Gómez.

Graficas de control para variables.

Las gráficas de control para variables se usan con el fin de controlar la media y la variabilidad de la distribución de un proceso.

Graficas R

Es una gráfica de rango se usa para vigilar la variabilidad de los procesos. Para calcular el rango de un conjunto de datos de muestra, se resta la medición más pequeña de la más grande obtenida en cada muestra. Si cualquiera de los datos queda fuera de los límites de control, se dice que la variabilidad del proceso no está bajo control.

Los límites de control para los rangos se calculan con la fórmula que se muestra en la figura 7.

$UCL_R = D_4 \bar{R} \quad y \quad LCL_R = D_3 \bar{R}$ <p>donde:</p> <p>\bar{R} = promedio de varios valores R pasados y la línea central de la gráfica de control.</p> <p>D_4 y D_3 = constantes que proporcionan tres acotamientos de desviación estándar (tres sigma) para un tamaño de muestra dado.</p>

Figura 7. Fórmula para calcular los límites de control en una gráfica de Rangos.

Los valores de D_4 y D_3 están dados por constantes que se ajustan dependiendo del tamaño de la muestra, estos valores se pueden obtener de la tabla 3, se puede observar que la expansión entre los acotamientos de control se vuelve más estrecha cuando aumenta el tamaño de la muestra, estos por contar con más información como base para hacer una estimación del rango del proceso.

Tabla 3. Factores para calcular acotamientos 3 sigmas para la gráfica X y la gráfica R.

Tamaño de la muestra (n)	Factor para UCL y LCL para gráficas \bar{x} (A_2)	Factor para LCL para gráficas R (D_3)	Factor para UCL para gráficas R (D_4)
2	1,880	0	3,267
3	1,023	0	2,575
4	0,729	0	2,282
5	0,577	0	2,115
6	0,483	0	2,004
7	0,419	0,076	1,924
8	0,373	0,136	1,864
9	0,337	0,184	1,816
10	0,308	0,223	1,777

Fuente: 1950 ASTM Manual on Quality Control of Materials. American Society for Testing Materials.

Graficas \bar{X}

Estas son utilizadas para medir una media. Cuando las causas asignables a la variabilidad al proceso han sido identificadas y la variabilidad de dicho procesos se encuentra dentro de control estadístico se puede construir una gráfica \bar{X} . Se puede observar que en los límites de control se usa el valor R, por esta razón la gráfica de \bar{X} deberá hacerse posteriormente de que la variabilidad del proceso ha quedado bajo control, los valores de A_2 se pueden ver en la tabla 3.

Las formulas usadas para calcular los límites de control LCS y LCI se muestran a continuación;

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad \text{y} \quad LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

donde:

$\bar{\bar{x}}$ = línea central de la gráfica y el promedio de las medias de una muestra pretérita o un valor establecido como objetivo para el proceso

A_2 = constante para proporcionar acotamientos tres sigma para una media de la muestra.

Figura 8. Fórmulas para calcular los límites de control de un gráfica de medias \bar{x} .

Análisis del Sistema de Medición.

Entendamos como Sistema de Medición aquellos procedimientos, operaciones, instrumentos, equipos, herramientas, software, patrones, gauges y personas involucradas en el proceso para tomar dimensiones, pesos, densidades, volúmenes, etc., de un objeto, pieza o incluso medir el comportamiento de algún proceso, a grandes rasgos son todo los factores que influyen para poder designar un valor a la característica que está siendo sujeta de evaluación.

Analizar un sistema de medición es de suma importancia para poder determinar que los datos obtenidos en las mediciones son correctos y que no presentan algún sesgo lo que sería crucial para dar un dictamen de aprobación o rechazo de las piezas a evaluar, si el sistema de medición tiene variaciones fuera de lo común, es decir de carácter especial y que no son variaciones naturales del proceso entonces se puede notar que no está en control estadístico o estabilidad estadística.

Como lo indica Miranda (2006) “los procedimientos deberán asegurar que los sistema de medición evalúen las siguientes propiedades estadísticas: repetibilidad, reproducibilidad, exactitud, estabilidad y linealidad” (p.40) entendamos entonces que uno de los estudios para evaluar lo anterior mencionado es conocido como estudio R&R que evalúa la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones. En estos estudios

se toma en cuenta la variación que ejerce el operador y la variación que puede presentar el instrumento con el que se está midiendo y a su vez la relación que hay entre ambos factores, la variación de la característica a medir y una variación general o total de todo el sistema, (Miranda, 2006).

De acuerdo a la secuencia que propone la metodología de Six Sigma conocida como DMAIC por sus siglas en inglés y que traducidas al español se refieren a los siguientes pasos: definir, medir, analizar, implementar o mejorar y por último controlar es necesario para que los datos estén consistentemente libres de errores como pueden ser factores humanos por entrenamiento inapropiado, procedimientos deficientes o bien sistemas automatizados o incluso un sistema de diseño inadecuado.(Socconini, 2015).

Con lo anterior señalado comenzaremos por validar el sistema de medición que se tiene del proceso actualmente para lo cual recurriremos a un estudio R&R para ello hay 3 métodos recurrentes para realizarlo de acuerdo al manual MSA de la AIAG:

- Método de los rangos
- Método de los promedios y rangos (incluyendo el método de las gráficas de control)
- Método de ANOVA

“Se prefiere el método ANOVA porque mide el error del gage por la interacción entre el operador y las partes, mientras que los métodos de los Rangos así como los Promedios y los Rangos no incluyen esta variación”. (MSA, AIAG, 2010), Además este método puede identificar otras formas de variación la única condición deseable es que el usuario cuente con un programa de computación apropiado para realizar dicho

análisis, en este caso de estudio se estará utilizando el software conocido como Minitab.

Un sistema de medición debe cumplir con 5 características importantes para que las mediciones que se realicen tenga un confiabilidad aceptable, las peculiaridades inherentes a estos sistemas son las siguientes: exactitud, precisión, discriminación (resolución), estabilidad (consistencia), repetibilidad y reproducibilidad (R&R).

En la figura 6, podemos ver una representación gráfica del significado de cada uno de los conceptos anteriores.



Figura 9. Representación gráfica para observar las diferentes combinaciones entre precisión y exactitud.

Repetibilidad.

Como lo indica el Manual MSA en su cuarta edición es: “Variación de las mediciones obtenidas con un instrumento de medición cuando se use varias veces por un usuario y midiendo la misma característica y sobre la misma parte” en otras palabras es bien la capacidad del calibre para dar resultados consistentes (precisión) cuando se realizan pruebas de manera repetida.

Reproducibilidad.

Podemos entender la reproducibilidad como: “Variación en el promedio de las mediciones hechas por diferentes usuarios usando el mismo gage y midiendo una

característica de una parte” (Manual MSA, 4ta edición, pag.7), con la anterior definición entendamos que esta característica compara la diferencia que hay entre varias personas al medir la misma característica con el mismo instrumento.

Método ANOVA para Gage R&R.

ANOVA significa Análisis de Varianza, es un método que prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales.

Gage R&R.

El manual MSA de la AIAG indica una serie de condiciones para poder realizar un estudio aceptable, a continuación se detallan los pasos para el estudio:

- 1) Obtener una muestra de $n > 5$ de partes que estén dentro del rango actual o esperado de la variación de los procesos. Se recomienda una muestra > 15 para un mínimo de confiabilidad en los resultados.
- 2) Hacer referencia los evaluadores como A, B, C etc., y el número de partes 1 hasta n de manera que los números no sean visibles a los evaluadores. Pag. 82 “Los evaluadores elegidos deberían ser seleccionados de aquellos que normalmente operen el instrumento”. (MSA, AIAG, 2010).
- 3) Calibrar el gage si es parte del procedimiento normal del sistema de medición. Los evaluadores medirán la n partes un orden aleatorio.
- 4) Todos los evaluadores deben medir las mismas partes n sin ver las lecturas de uno con otro.

- 5) Repetir el ciclo usando un orden aleatorio diferente de las mediciones y registrar los datos en la posición de la pieza que le corresponde.

Otro aspecto importante a considerar es que el dispositivo tiene que contar con una discriminación que permita al menos 1 decimo de la variación del proceso esperado de la característica, esto quiere decir que si la característica es 0.001” el equipo debería ser capaz de leer un cambio de 0.0001”. “Los dispositivos análogos debieran registrar en un medio de la graduación más pequeña o el límite de sensibilidad o resolución. Para dispositivos análogos si la más pequeña de la escala es 0.0001”, entonces los resultados de las mediciones debieran registrarse en 0.00005” (MSA. AIAG, 2010).

Los índices CP y Cpk

Cada proceso en calidad debe cumplir con especificaciones definidas, estos mismos procesos poseen variables de salida, las cuales a su vez deben estar dentro de las especificaciones para así poder considerar que el proceso está funcionando de manera adecuada. Evaluar la capacidad o la habilidad de un proceso radica en evaluar la amplitud de la variación natural del mismo para alguna especificación o característica de calidad dada a evaluar, lo cual dejara saber en qué medida dicha característica crítica es satisfactoria o está cumpliendo con las especificaciones.

Índice Cp

Este es conocido como el *índice de capacidad potencial del proceso*, y se puede definir matemáticamente de la forma que lo muestra la siguiente formula:

$$C_p = \frac{ES - EI}{6\sigma}$$

Donde ES representa la especificación superior, EI indica la especificación inferior y σ (sigma) representa la desviación estándar. El índice Cp compara el ancho de las especificaciones o bien la variación tolerada para el proceso con la amplitud de la variación real del mismo:

$$C_p = \frac{\text{Variación tolerada}}{\text{Variación real}}$$

Entendamos que 6σ (seis veces la desviación estándar) es la variación que realmente posee el proceso debido a la propiedades de la distribución normal, en donde se asevera que entre $\mu \pm 3\sigma$ se encuentran 99.73% de los valores de una variable con distribución normal. Inclusive si no hay normalidad en $\mu \pm 3\sigma$ se encuentra un gran porcentaje de la distribución debido a la desigualdad de Chebyshev y a la regla empírica.

La capacidad del proceso hace una comparación de la salida de un proceso que está en control estadístico con respecto de los límites especificación del mismo, esto se realiza con el coeficiente Cp, esto quiere decir que el Cp compara el ancho de las especificaciones con la amplitud de la variación del proceso.

Para Pascal, Pelayo, Serra y Casalins (2010)

Resulta conveniente destacar que la evaluación de la capacidad del proceso se inicia después de que en los gráficos X – R las causas especiales han sido identificadas, analizadas y corregidas, a los fines de garantizar que se cuenta con un

proceso estadístico. Si la variación del proceso es mayor que la amplitud de las especificaciones, entonces el Cp es menor que 1, lo que sería evidencia de que no se está cumpliendo con las especificaciones (p. 197).

Índice Cpk

En comparación el índice Cp estima la capacidad potencial del proceso para poder cumplir con las tolerancias, sin embargo una desventaja es que no toma en cuenta el centrado del proceso, esto es que no valora si el proceso está en la media de las dimensiones solo si estas no se han salido de los límites, por lo tanto el Cp se puede modificar para determinar también donde se localiza la media del proceso respecto a las especificaciones. A este índice Cp modificado se le llama Índice de Capacidad Real o Cpk.

$$C_{pki} = \frac{(T_s - \bar{X})}{3\sigma} \quad \text{y} \quad C_{pks} = \frac{(\bar{X} - T_i)}{3\sigma}$$

El índice de Cpk será idéntico al Cp cuando la media del proceso se ubique en el punto medio de las especificaciones. Cuando el comportamiento del procesos no está centrado entonces el valor del Índice Cpk será menor que el Cp.

Capítulo III. Metodología

Estudio R&R.

Se realizara un estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad usando el método de ANOVA (análisis de varianza) apoyado del software de minitab, siguiendo la siguiente condición de recopilación de datos:

1. Se seleccionaron 10 piezas al azar de flecha para motor que tenían un rango dentro del espectro de especificación de 0.2499" a 0.2500" en el diámetro de la chumacera justo al centro de la pista.
2. Las piezas fueron medidas por el metrólogo y se les asigno un número de pieza y el valor real que tiene cada una.
3. Se dieron a medir las 10 piezas 2 veces a cada uno de los 3 operadores de las máquinas de rectificadas, la secuencia a medir de cada pieza fue al azar en las dos oportunidades.
4. Los valores de cada operador fueron registrados en una tabla, sin que el operador a realizar las mediciones pudiera observar las lecturas de los otros compañeros.
5. Con los datos obtenidos se introdujeron a Minitab para posteriormente realizar el análisis de los resultados.

El segundo estudio de R&R fue conducido de la misma manera que el primer estudio.

Estudio de distribución.

Para el estudio de distribución se recolectaron 100 muestras de flechas del proceso al azar de un lote de 5,000 piezas e indistintamente del operador que las fabrico. Posteriormente estos datos fueron introducidos en el software de Minitab versión 2017 para realizar una prueba de Probabilidad con gráficos para verificar a qué tipo de distribución se asemejan más, al final se realizó el análisis de los datos.

Estudio de CP Y CPK.

Con la misma muestra recolectada para el estudio de distribución se introdujeron los datos al software de minitab y se realizó un análisis de capacidad de proceso usando los límites de especificación de 0.2499" a 0.2502" en el primer estudio.

Para el 2do estudio de capacidad de proceso se ampliaron los límites de especificación hasta 0.2497" a 0.2502", usando los mismo datos y con apoyo del software de minitab esto con la intención de verificar información revisada en el marco teórico, posteriormente se analizaron los resultados.

Revisión de propuestas de mejora.

Se revisó información vía web para encontrar un instrumento de medición que tenga mejor resolución y muy bajo error de reproducibilidad, posteriormente se contactó al proveedor para una demostración y verificación del uso, no se pudo realizar un estudio más completo por falta de tiempo para que el proveedor prestar el equipo.

Capítulo IV. Desarrollo

Actualmente la organización cuenta con un procedimiento para el Control Estadístico del Proceso en el área de maquinado, dicho procedimiento aplica en todas piezas que son rectificadas con la intención de asegurar que las dimensiones en los diámetros de rectificado cumplen con la especificación.

La metodología actual usada para el control del proceso indica que el operador debe llenar una gráfica X&R (rangos y medias) para lo cual se deben recolectar 5 muestras del diámetro de la chumacera, del diámetro del cuerpo y del diámetro para el balero, cada muestra es recolectada cada hora por el operador y registrada en formato que dispone de 30 subgrupos de 5 muestras cada uno para anotar los valores de los diámetros, al final de cada subgrupo se calcula y registra el valor de la media y el rango de cada uno de ellos para posteriormente registrarlos en la gráfica que previamente ha sido trazada con los límites superior e inferior de acuerdo a la especificación según se la zona que se esté midiendo, el formato tiene como objetivo representar gráficamente el comportamiento de los valores en los diámetros medidos, de tal modo que el operador sea capaz de observar la tendencia de las piezas y pueda ajustar la máquina para que los diámetros que son rectificadas se mantengan dentro de especificaciones. Para medir las muestras se usa un micrómetro digital de 0" a 1" con resolución de 0.00005" cienmilésimas de pulgada sujeto por una base para micrómetros, la lectura de la dimensión es tomada en el centro de la pista para el caso de la chumacera, en 3 puntos para el caso del diámetros del cuerpo y en 2 puntos para el diámetro del balero, tal y como se muestra en la figura 2,3 y 4.

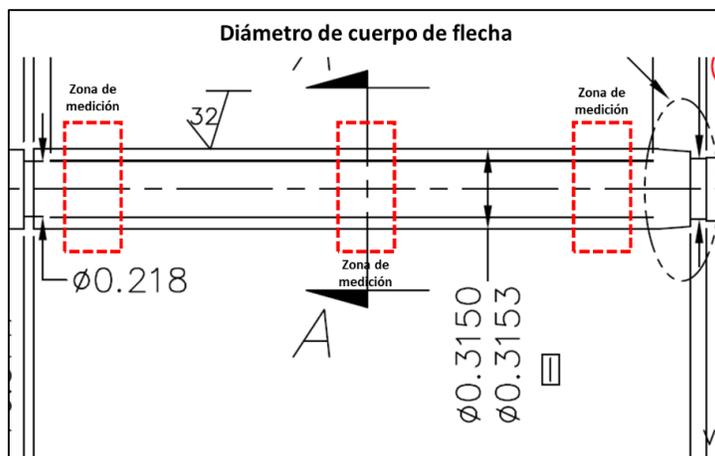


Figura 10. Zonas de medición en el diámetro del cuerpo de la flecha indicada con líneas punteadas rojas.

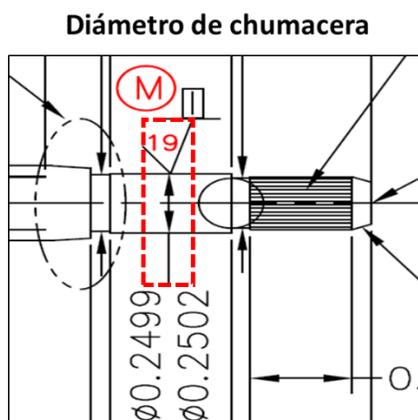


Figura 11. Zonas de medición en el diámetro de la chumacera de la flecha indicada con líneas punteadas rojas.

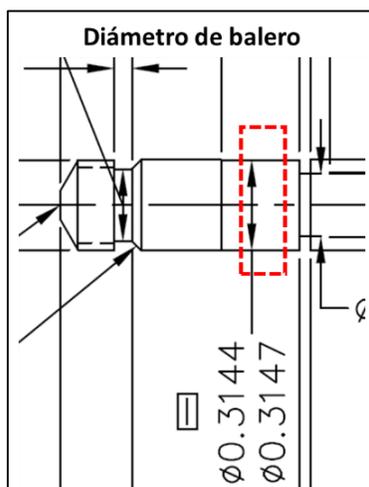


Figura 12. Zonas de medición en el diámetro de la chumacera de la flecha indicada con líneas punteadas rojas.

Los valores de las medias y los rangos son introducidos en una hoja de cálculo de Excel que está formulada para obtener los valores del Cp y Cpk.

Contexto del estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad

Derivado de un estudio de Cp y Cpk realizado a principios del presente se pudo observar que la prueba de normalidad obtuvo un P-value menor que 0.05, esto quiere decir que el proceso no se comporta de forma normal, sin embargo esto puso en tela de juicio la veracidad de los datos tomados. En la tabla 2 se presenta los 100 datos recabados del estudio realizado en el mes de enero.

Tabla 4. Datos en pulgadas tomados del diámetro de la chumacera de una muestra de 100 flechas.

No. de muestra	Dimensión								
1	0.25000	21	0.25010	41	0.24990	61	0.24985	81	0.25000
2	0.24990	22	0.25000	42	0.25000	62	0.25000	82	0.24990
3	0.25000	23	0.25015	43	0.25005	63	0.24990	83	0.24995
4	0.25010	24	0.25000	44	0.24990	64	0.24990	84	0.24995
5	0.25000	25	0.24995	45	0.24995	65	0.24990	85	0.25005
6	0.24990	26	0.25005	46	0.25010	66	0.25005	86	0.24990
7	0.25000	27	0.25000	47	0.25000	67	0.24995	87	0.24990
8	0.24990	28	0.24995	48	0.25010	68	0.24990	88	0.25000
9	0.25000	29	0.24995	49	0.25005	69	0.24985	89	0.25005
10	0.25000	30	0.24995	50	0.25010	70	0.24990	90	0.25005
11	0.25000	31	0.25015	51	0.25005	71	0.25005	91	0.25000
12	0.25000	32	0.24995	52	0.25010	72	0.25010	92	0.25005
13	0.25010	33	0.25000	53	0.25010	73	0.24995	93	0.25000
14	0.25000	34	0.25005	54	0.24990	74	0.25010	94	0.25000
15	0.24995	35	0.25005	55	0.25005	75	0.24995	95	0.24995
16	0.24990	36	0.25000	56	0.24990	76	0.25000	96	0.25000
17	0.24990	37	0.25010	57	0.25010	77	0.25005	97	0.24995
18	0.25005	38	0.24990	58	0.25005	78	0.25010	98	0.24980
19	0.25000	39	0.25000	59	0.25005	79	0.25000	99	0.24990
20	0.25015	40	0.25000	60	0.24990	80	0.25010	100	0.25005

Los datos fueron recabados por el auditor de proceso de forma aleatoria con piezas de los 3 turnos usando un micrómetro con resolución de 0.00005" de pulgada, se introdujeron al software de Minitab para poder calcular la prueba de normalidad, se pueden observar los resultados en la figura 6.

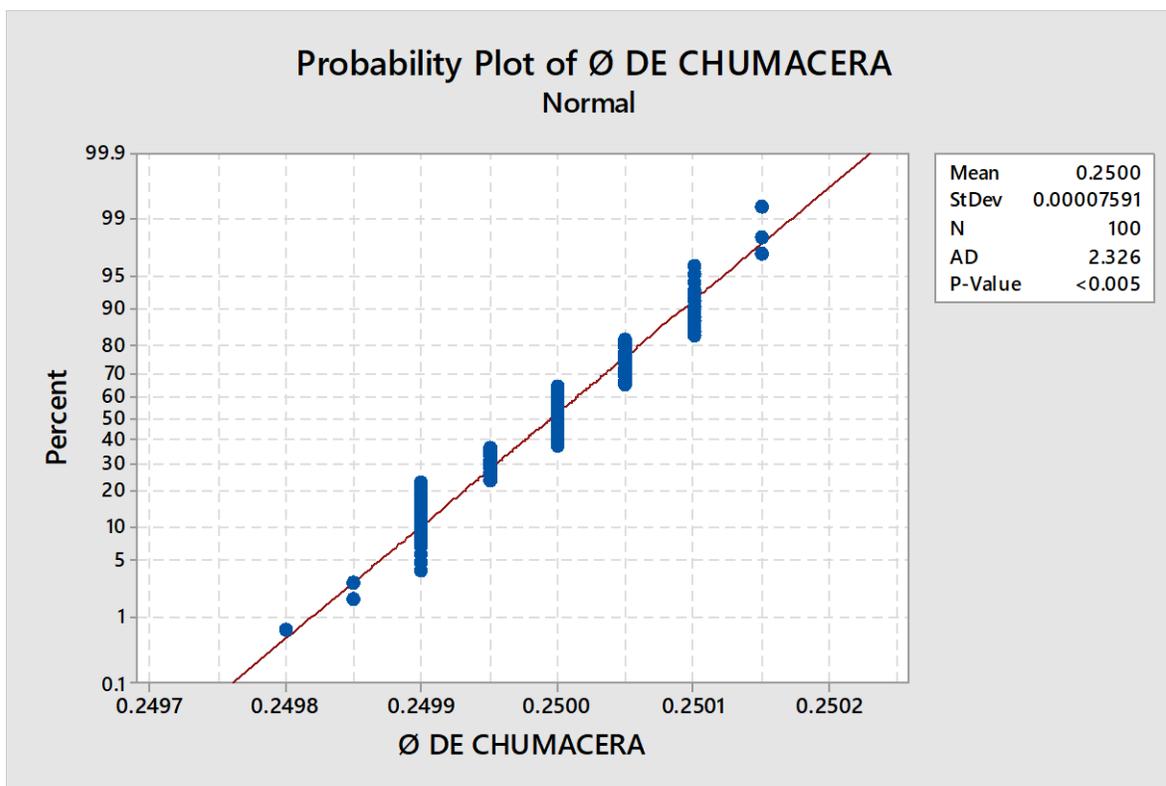


Figura 13. Prueba de normalidad Anderson-Darling, diámetro de chumacera.

Como podemos observar el P-value tiene un resultado <0.005 por lo cual podemos inferir que los datos recabado no presentan un comportamiento normal, también podemos verlo en la figura 7 que representa una gráfica de frecuencias de cada uno de los valores obtenidos.

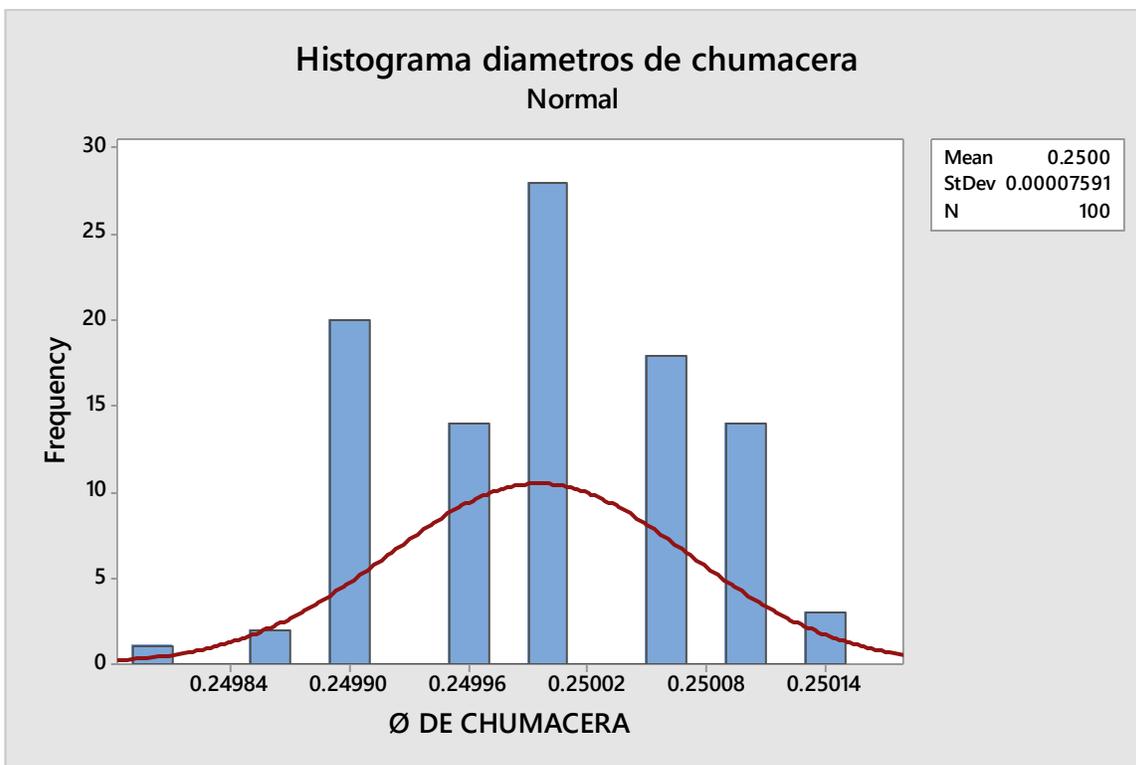


Figura 14. Grafica de frecuencias de valores para los diámetros de chumacera.

La grafica debería representar una barra de mayor tamaño para los valores que más se repiten y hacia ambos lados debería descender según el comportamiento de los valores, podemos inferir que el proceso está siendo alterado por elementos externos que afectan el comportamiento normal de los datos.

Como se ha mencionado la prueba de normalidad realizada con los datos recabados nos hace pensar en la veracidad de los datos o bien si lo datos son verdaderos podemos revisar en el proceso cuales son las variables que lo alteran. Par validar la veracidad de estos datos se requiere realizar un análisis de repetibilidad y reproducibilidad conocido como R&R

Desarrollo del Estudio R&R.

Actualmente se cuenta con 2 máquinas rectificadoras habilitadas para trabajar el mismo número de parte en ambas, en este caso de estudio solo analizaremos el sistema de medición de la rectificadora que será identificada como la maquina número 1 y por consiguiente la segunda rectificadora será conocida como número 2 para fines prácticos del estudio. La rectificadora número 1, es la que produce normalmente puesto la numero 2 es habilitada solo cuando los volúmenes de producción son más altos por lo tanto la elección de hacer únicamente el estudio en la numero 1 posteriormente se podrán replicar las acciones para el procesos en la rectificadora número 2. El día productivo está dividido en 3 turnos cada turno tiene un operador responsable de medir las piezas que produce y a su vez en cada turno hay un Auditor de Calidad encargado de monitorear y dar arranque de primera pieza.

Para fines del estudio identificaremos a los operadores con las siguientes letras de acuerdo al turno asignado como se muestra en la tabla número 2.

Tabla 5. Distribución de operadores y auditores por turno.

1 TURNO	2 TURNO	3 TURNO
Operador A (OA)	Operador B (OB)	Operador C (OC)
Auditor A (AA)	Auditor B (AB)	Auditor C (AC)

Con la distribución mostrada en la tabla estamos cumpliendo con mínimo 2 usuarios comunes del sistema, tenemos 6 usuarios comunes del sistema por lo que los resultados del estudio otorgaran más datos para validar el sistema, por lo que

podremos comparar las variaciones entre auditor vs auditor, operador vs operador y auditor vs operador.

El instrumento de medición usado para la toma de los datos fue un micrómetro digital de 0" a 1" el cual tiene una resolución de 0.00005" cienmilésimas de pulgada como el que se muestra en la figura 15.



Figura 15. Imagen de un micrómetro de exteriores con rango de 0" a 1"

La resolución adecuada de un instrumento de medición debe cumplir la relación de 1/10 del rango de tolerancia en la especificación esto es que para calcular la resolución adecuada de un instrumento de medición debemos aplicar la siguiente ecuación:

$$(LSE - LIE) / 10 = \text{Resolución adecuada}$$

Siendo:

LSE: límite superior de especificación

LIE: límite inferior de especificación

Sustituyendo los valores del ejercicio anterior en la ecuación el resultado es el siguiente:

$$(0.2502'' - 0.2499'') / 10 = 0.00003''$$

De acuerdo a lo anterior analizado podemos concluir que el instrumento con el cual se han tomado las lecturas no podría ser el más adecuado ya que nos está entregando lecturas con una resolución de hasta 0.00005'' (cienmilésimas de pulgada), lo ideal es que se tuviera acceso a un instrumento con lecturas de 0.00001'' para poder tener lecturas más precisas sin embargo esto es utópico pues no hay un instrumento comercial y con costo accesible capaz de realizar este tipo de mediciones, esto resulta ser muy importante ya que repercutirá en las siguientes condiciones del proceso y que más tarde abordaremos en la investigación. Por falta de acceso a un instrumento con una capacidad o resolución mayor la investigación se realizara con el actual este instrumento para el estudio R&R resulta funcional y no implica una variable importante para los resultados del estudio los cuales solo se tomaran en cuenta valores hasta en 0.0001'' (diezmilésimas de pulgada) lo cual el instrumento actual si puede otorgar sin inconvenientes. El micrómetro usado para las mediciones es apoyado sobre una base porta micrómetros como la que se muestra en la figura 16.



Figura 16. Base para sujetar micrómetro estándar.

La base anterior tiene como finalidad sujetar el micrómetro en una posición cómoda para el operador y evitar que este sujetando el aparato de medición como se muestra en la figura 5.



Figura 17. Micrómetro apoyado en base para poder tomar lecturas correctamente.

Recolección de datos Gauge R&R

Se ha recolectado 10 muestras como mínimo recomendado de acuerdo al método de la AIAG, tomadas de forma aleatoria del número de parte antes mencionado, cada muestra está dentro del rango de operación común del proceso lo que es 0.2499" a 0.2502" las muestras han sido recabadas por el Auditor A y verificadas por la persona responsable de Metrología. Cada muestra ha sido identificada con un número del 1 al 10 de forma aleatoria.

Las piezas han sido medidas en las zona de la chumacera justo en la parte media de las pista, esto puede ser considerado como otra variable dentro del sistema de medición, durante el estudio se podrá observar si todos los evaluadores toman la dimensión en la misma zona.

En la tabla 3 se muestran los resultados de las lecturas de cada uno de los evaluadores con 2 repeticiones por cada pieza, en cada intento se han proporcionado las muestras de forma aleatoria a los evaluadores.

Tabla 6. Resultado de las mediciones

OPERADOR	A		B		C	
MUESTRA	1	2	1	2	1	2
1	0.25000	0.25000	0.25010	0.25010	0.24995	0.24990
2	0.24995	0.24995	0.25000	0.25000	0.24985	0.24985
3	0.24995	0.24995	0.25000	0.24990	0.24980	0.24980
4	0.25000	0.25000	0.25010	0.25010	0.24995	0.24995
5	0.25000	0.24995	0.25000	0.25000	0.24995	0.24990
6	0.24990	0.24995	0.25000	0.25000	0.24990	0.24985
7	0.25000	0.24990	0.24990	0.25000	0.24990	0.24985
8	0.24990	0.24990	0.24990	0.25000	0.24990	0.24990
9	0.25010	0.25015	0.25020	0.25020	0.25000	0.25005
10	0.24995	0.24990	0.25000	0.25000	0.24985	0.24985

Una vez recolectados los datos han sido capturados en el software de Minitab para realizar el estudio R&R en la figura 8, usando el método de ANOVA.

Resultados del primer estudio R&R

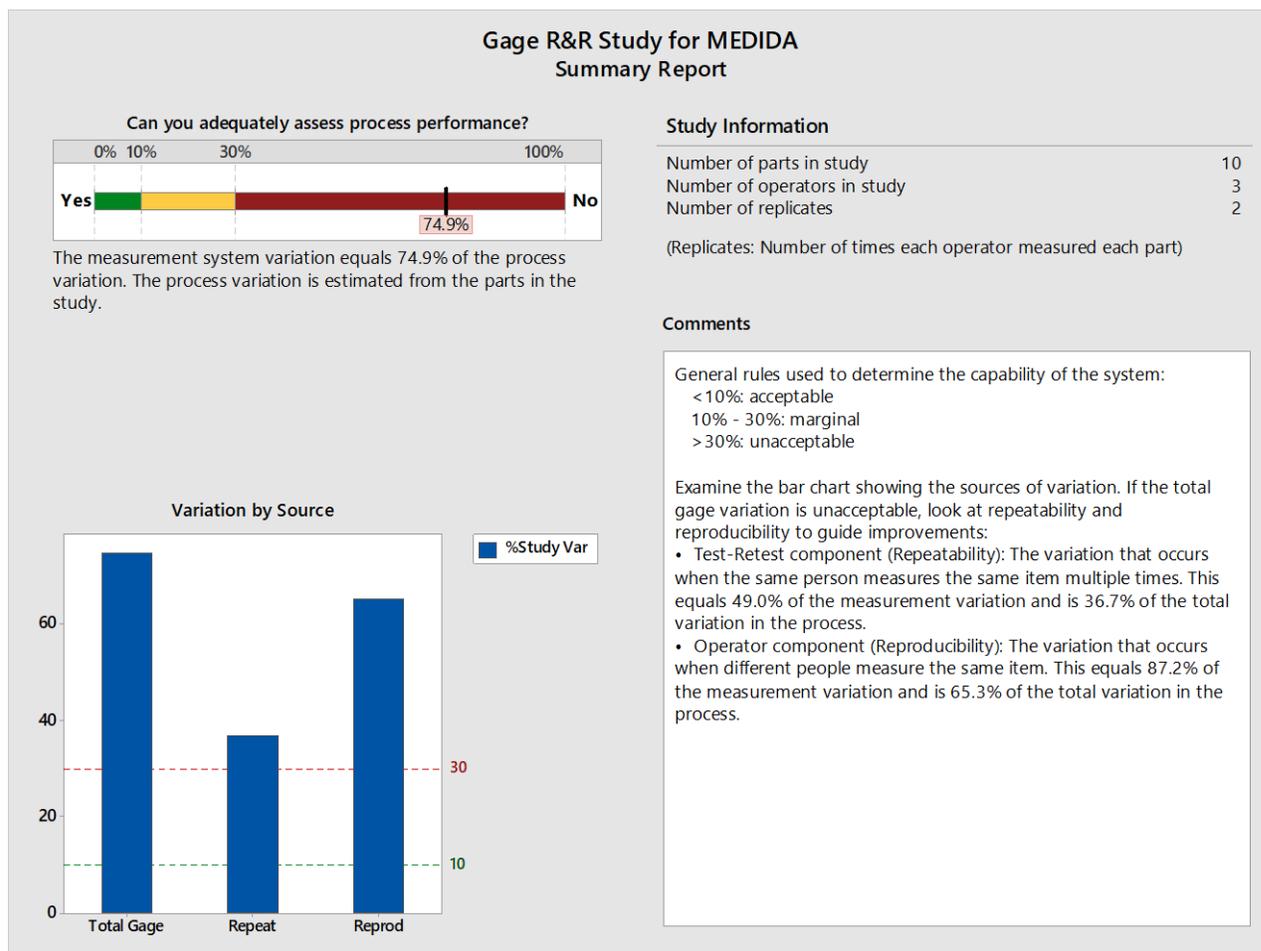


Figura 18. Resumen del Gage R&R #1 realizado en Minitab.

De acuerdo a lo observado en la figura 16 el porcentaje de variación del estudio arroja un valor de 74.9%, este resultado indica que la variación del sistema de medición es muy alta. De acuerdo a la información que se encuentra en la página web oficial del Software de minitab esta variación debería ser menor al 10% para que el sistema sea aceptable (se puede observar en el cuadro de comentarios de la fig. 18. Vemos que la mayor variación se encuentra en el Gage (instrumento de medición) seguida de la variación en la reproducibilidad esto quiere decir que cada evaluador del proceso

puede obtener diferentes valores de la misma pieza lo cual es inaceptable para controlar la calidad del producto.

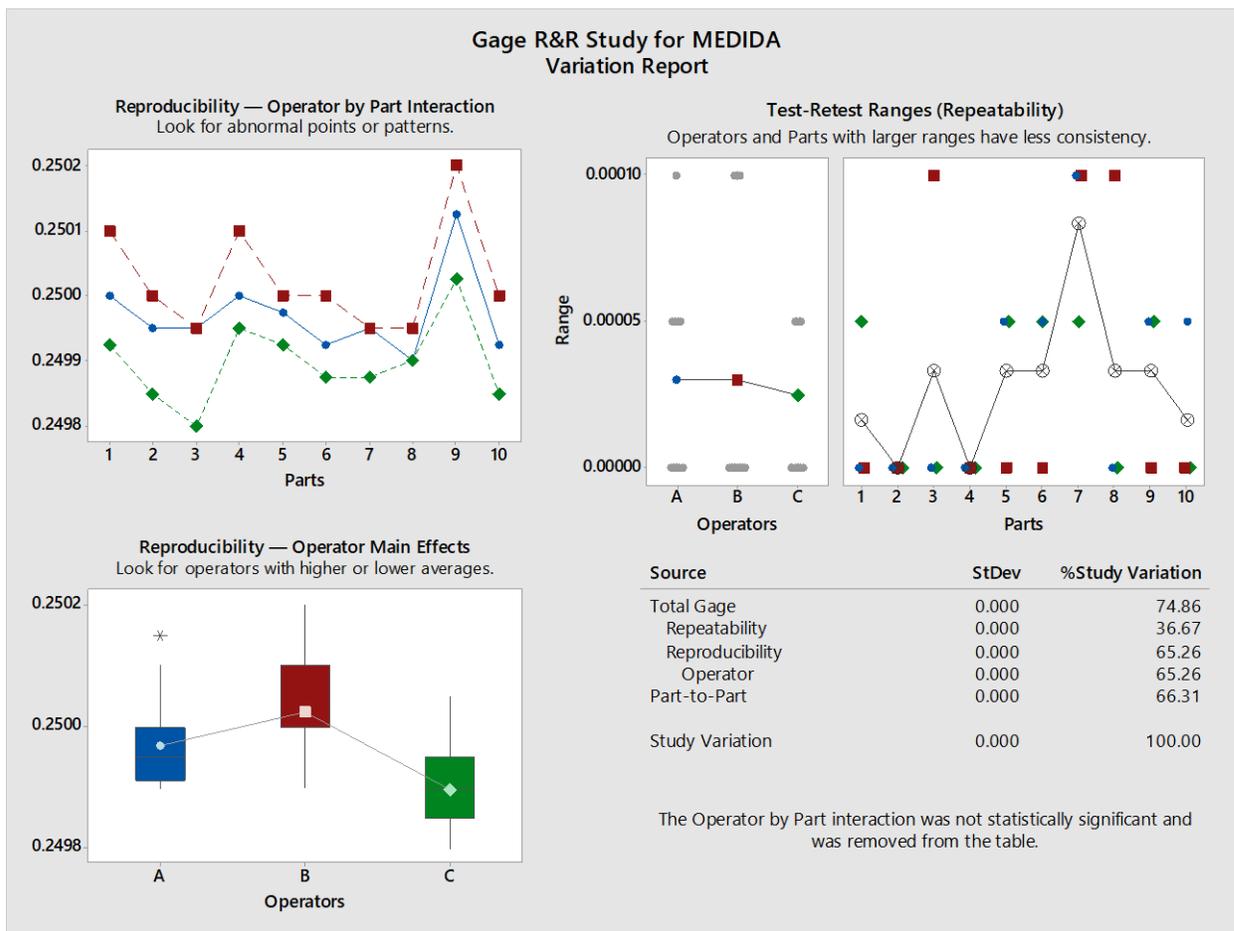


Figura 19. Reporte de variación en Gráficos en Minitab.

En la figura 19 podemos observar en el gráfico de caja de reproducibilidad entre operadores, que el operador B es el que tiene más variación con referencia a los operadores A y C sin embargo los 3 operadores presentan mucha variación entre ellos, por ejemplo la pieza numero 9 tuvo lecturas de 0.2502” para el operador B, de 0.2501” para el operador A y de 0.2500” para el operador C con esta variación pudiéramos

estar descartando piezas buenas como malas o viceversa aceptar piezas malas como buenas, puesto que el rango de tolerancia es tan marginal que hasta una variación de 1 diezmilésima afecta en el resultado de los productos.

Nuevo estudio R&R aplicando condiciones.

Durante el estudio se pudo observar algunas variables que pudieron generar que este tuviera variaciones importantes en las mediciones tomadas por cada operador las variables son las siguientes:

1. Los operadores indistintamente aprietan el micrómetro para tomar las lecturas de la zona del tambor y de la matraca o trinquete (ajuste fino), esto hace que la fuerza aplicada al momento de tomar la lectura sea distinta para cada operador y en cada pieza.
2. La zona en que se toma la lectura de la flecha tiene una longitud de 0.500” aproximadamente lo que da pauta a que la medida se tome en diferentes posiciones a lo largo de la pista.

Considerando las condiciones antes mencionadas se ha realizado nuevamente el estudio R&R con los mismo evaluadores, en resumen se les ha solicitado revisar la dimensión en la misma zona (ver figura 20) y apretar solo con la matraca o trinquete del micrómetro (ver figura 21) máximo 3 brincos del mismo, todas las dimensiones fueron tomadas en la misma área de rectificado que es donde se realizan la mediciones comúnmente con la finalidad de no alterar las condiciones del ambiente como son la temperatura, el ruido, el polvo, etc. esto resulta principalmente importante para que las lecturas sean lo menos alteradas a las condiciones habituales en las que son tomadas.

En la tabla 2 se muestran los resultados de la lecturas aplicando las reglas de medición anteriores.



Figura 20. Flecha para motor, con indicación de donde se debe tomar la lectura del diámetro de la pista de chumacera



Figura 21. Partes de un micrómetro estándar, se indica la zona de apriete llamada trinquete.

Tabla 7. Datos del \emptyset de la pista de chumacera aplicando las nuevas condiciones.

OPERADOR	A		B		C	
MUESTRA	1	2	1	2	1	2
1	0.2499	0.2499	0.2499	0.2499	0.2499	0.2499
2	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
3	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
4	0.2501	0.2501	0.2501	0.2501	0.2501	0.2501
5	0.2502	0.2502	0.2502	0.2502	0.2502	0.2502
6	0.2499	0.2499	0.2499	0.2500	0.2499	0.2499
7	0.2502	0.2501	0.2502	0.2502	0.2502	0.2502
8	0.2502	0.2502	0.2502	0.2502	0.2502	0.2502
9	0.2499	0.2499	0.2500	0.2499	0.2499	0.2499
10	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500

Como se puede observar los datos tomados fueron más consistente pues presentan más repetibilidad entre operadores, estos datos se han introducido nuevamente al software de minitab para realizar el estudio de ANOVA R&R por lo que se obtuvieron los siguientes resultados.

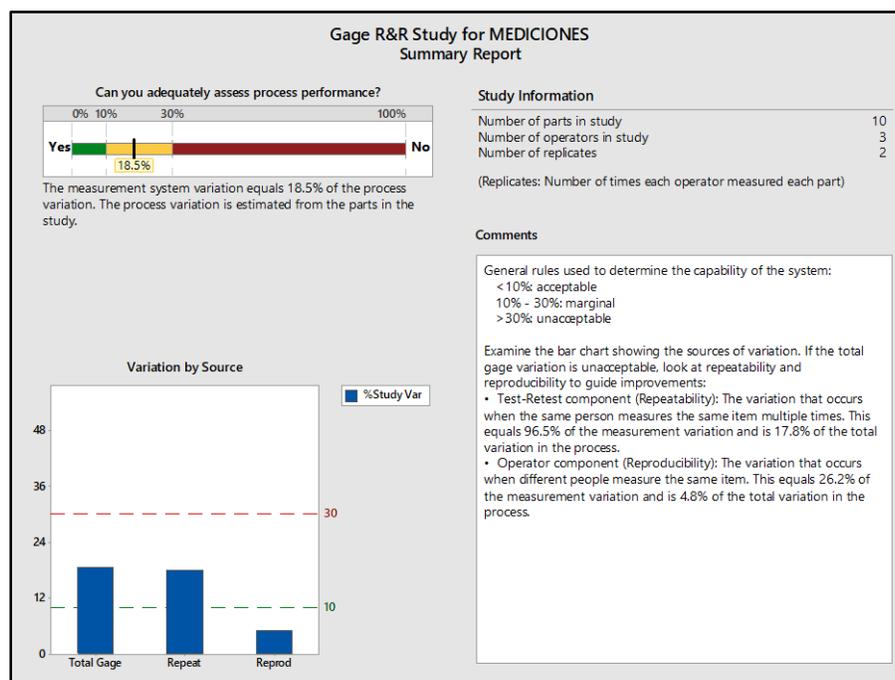


Figura 22. Resumen de resultados del 2do estudio R&R aplicando las nuevas condiciones.

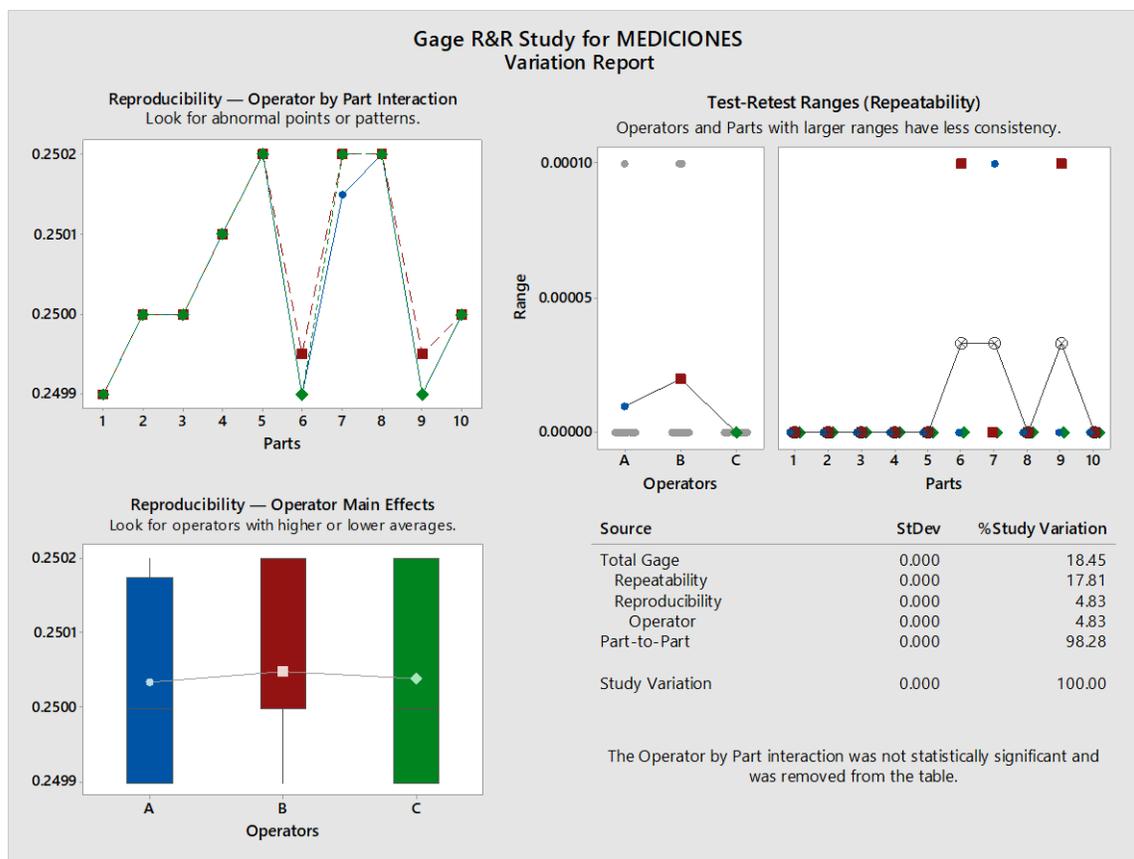


Figura 23. Graficas de resultados de 2do gage R&R.

Como se puede apreciar en la figura 22 se alcanzó una variación máxima del 18.5% en total del estudio lo que lo posiciona dentro del margen amarillo, también podemos ver en la figura 23 que la variación entre operadores es mucho menor esto indica que los 3 están midiendo la misma pieza con el mismo resultado al igual que la precisión del instrumento mejoró al realizar el apriete con el trinquete. De acuerdo con los comentarios del software podemos concluir que está en un rango marginalmente aceptable el cual debe ir del 10% al 30% de variación en total del estudio, esto quiere decir que se puede trabajar con dichas condiciones sin embargo se pueden realizar mejoras en el sistema de medición pero requieren de una mayor inversión, como un

nuevo instrumento más preciso, condiciones controladas como temperatura, humedad y suciedad, pero estas condiciones resultan particularmente costosas lo cual no resulta costeable por la organización como un proyecto de inversión, por lo tanto se decide dejar el estado del proceso así respetando las condiciones antes mencionadas.

Análisis de la distribución estadística de los Datos.

Resulta particularmente importante para poder realizar estudios de Cp y Cpk (capacidad del proceso) que los datos a analizar presenten un comportamiento de distribución normal esto es una condición importante de los estudios de Cp.

Como se pudo observar en el contexto del estudio de repetibilidad (fig. 13) el valor de probabilidad P-Value resulto menor a >0.05 por lo tanto los datos no siguen un distribución normal conocida. Si observamos a detalle la distribución que siguen los datos en al fig.15 los valores que más se repiten son el 0.2499” y el 0.2500”, esto en particularmente resulta curioso y nos puede dar indicios de que el proceso es intervenido para poder dar valores tan repetitivos.

Si bien no siguen los datos una distribución normal se puede buscar que tipo de distribución siguen los datos para que con ella se haga el cálculo de Cp y Cpk, el software de minitab ofrece una opción para poder obtener la distribución que más ajusta a los datos, a continuación se muestran varias distribuciones y sus resultados.

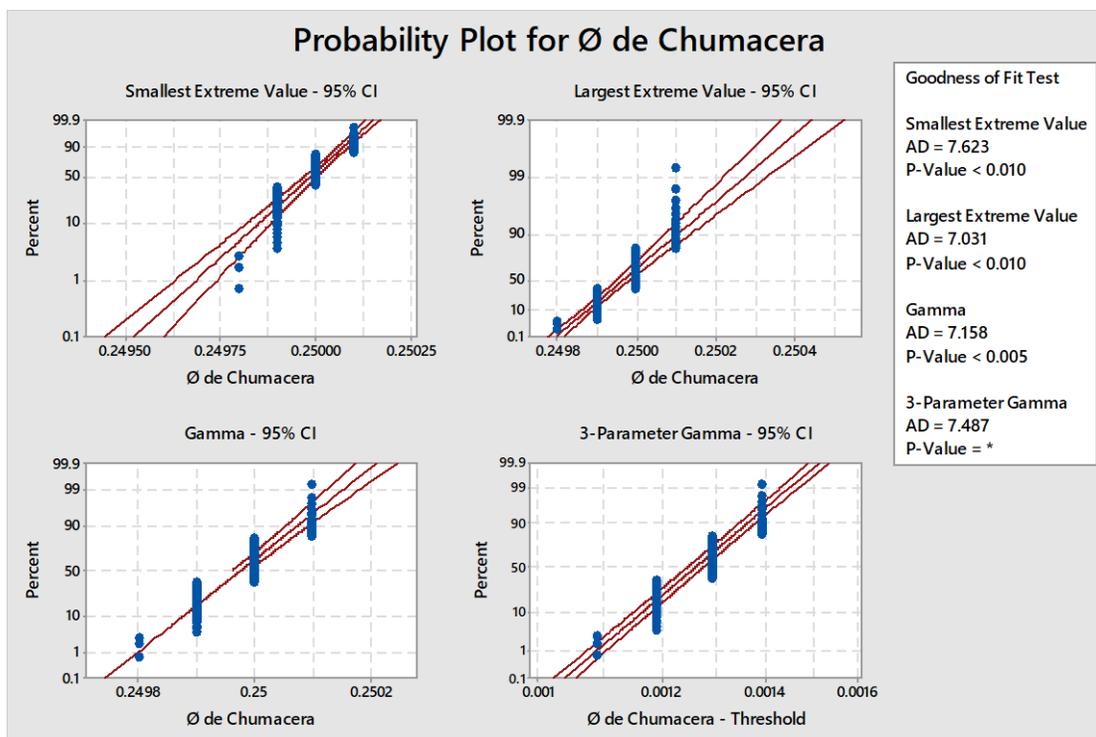


Figura 24. Gráficos de probabilidad de distribuciones conocidas

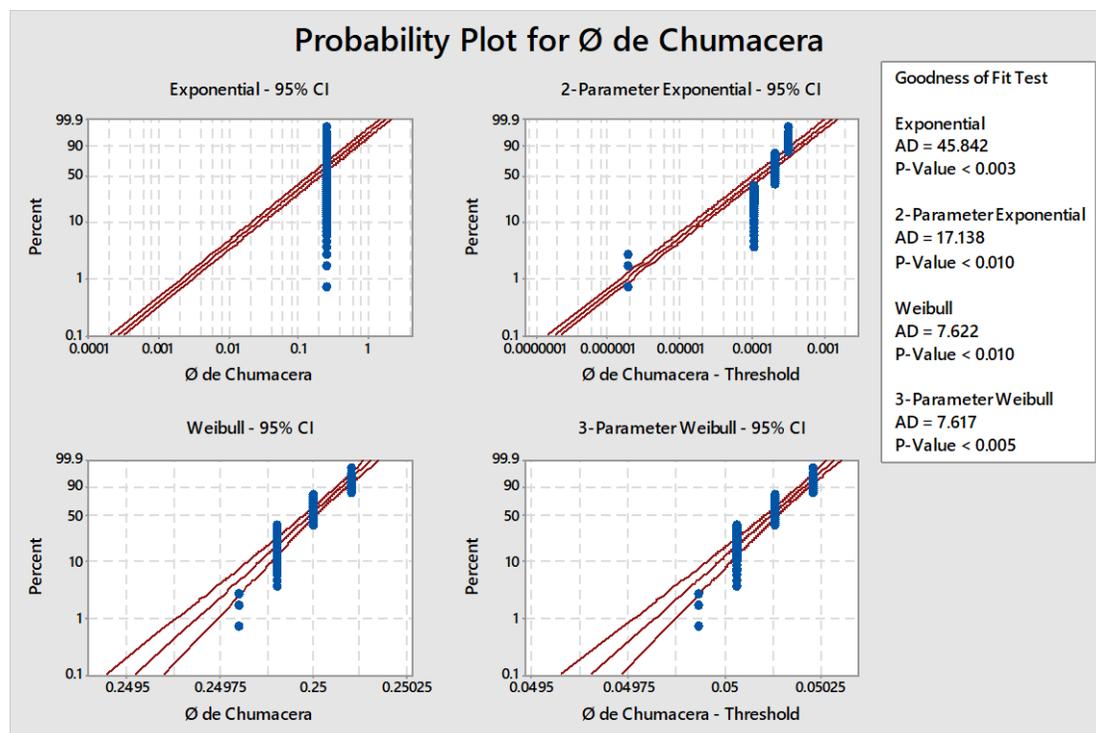


Figura 25. Gráficos de probabilidad de distribuciones conocidas

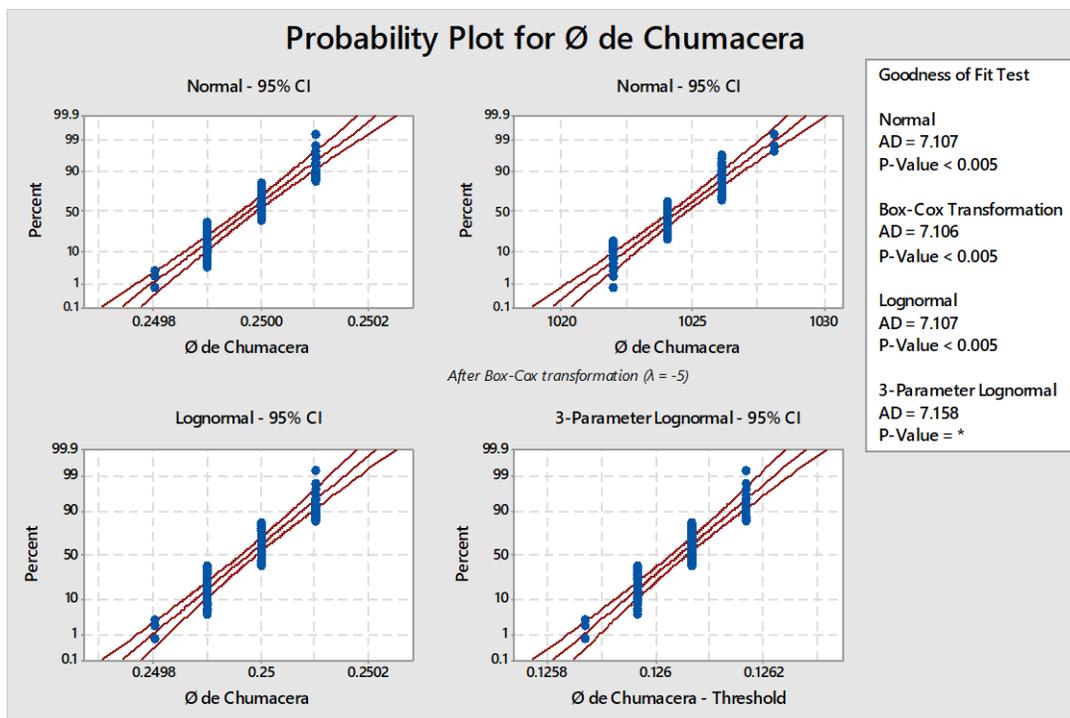


Figura 26. Gráficos de probabilidad de distribuciones conocidas

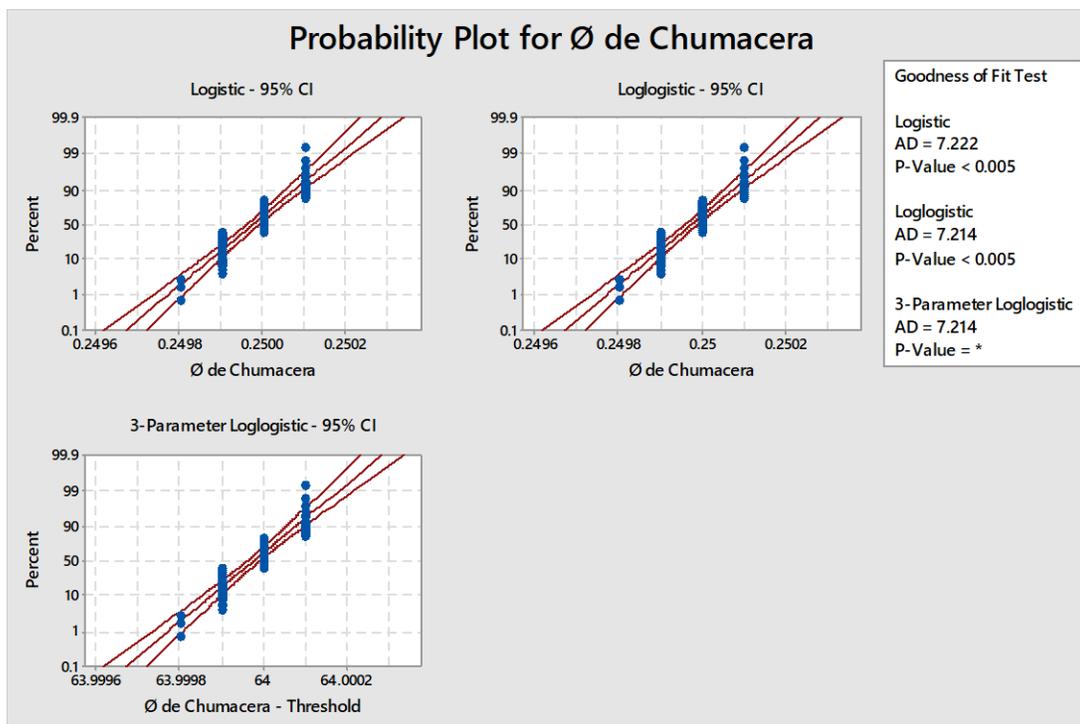


Figura 27. Gráficos de probabilidad de distribuciones conocidas

Ninguno de los ejemplos antes revisados fig. 24 – 27 cumple con la condición de tener un P-Value de >0.05 , un indicio más de que el proceso es intervenido o presenta algo en su comportamiento que impide que la distribución sea conocida. Una de las que más se acerca es a un tipo de distribución Weibull con un p-value de 0.01 sin embargo tampoco es del todo correcta pues no cumple con el criterio de >0.05 pero esto nos hace pensar que los datos se asimilan a un comportamiento más parecido a una forma exponencial.

Analizando el Proceso de Rectificado

Revisando las condiciones del proceso se pudo observar que los operadores al estar trabajando las maquinas rectificadoras tienen la posibilidad de ajustar con una perilla de ajuste fino el recorrido que hace la piedra de desbaste y con ello poder cerrar o abrir el diámetro de la flecha según la dimensión que presenten las piezas. Al arrancar con el proceso de rectificado durante las primeras piezas la especificación se mantiene pero al pasar de un tiempo aproximado de 20 minutos la piedra de desbaste sufre un desgaste lo que hace que el diámetro de la flecha crezca conforme pasa el tiempo. El operador puede empezar a trabajar con ajuste en la dimensión de 0.2499” y al pasar del tiempo las flechas incrementara su diámetro hasta 0.2502”, cuando este echo ocurre el operador manipula la perilla de ajuste para cerrar el recorrido de la piedra y así nuevamente disminuir la medida y evitar que esta salga fuera de especificación.

En entrevista con los 3 operadores principales de la maquina confirmaron esta situación, también comentaron que la dimensión que más buscan en el diámetro de las flechas es una dimensión pegada al límite inferior de especificación que es de 0.2499” a 0.2500”. Lo anterior confirmaría el comportamiento de la distribución que siguen los

datos pues bien no es y nunca será una distribución normal pues los operadores intervienen directamente en el proceso y pueden manipular a su antojo la dimensión del diámetro de la flecha además el desgaste paulatino a través del tiempo de la piedra de rectificado confirma también que lo más cercano al comportamiento de distribución de los datos sea exponencial pues conforme pase el tiempo el diámetro seguirá creciendo.

Pueda ser que exista un tipo de distribución normal solo si se analizaran los datos de cada operador por separado y ver si alguno de ellos pudiera ser capaz de manipular su proceso de tal modo que se forme una campana perfecta, pero para ello tendríamos que conocer el tiempo con el que la piedra pierde su filo y en ese instante el operador tendría que ajustar y también este ajuste tendría que ser controlado para que siempre repitiera en una dimensión deseada.

Como se pudo observar la distribución que seguirán los datos pueden variar impredeciblemente analizados por conjunto, se tendría que modelar un sistema diferente para este tipo de procesos. La intervención del operador en el proceso lo convierte en una causa asignable que repercute en un comportamiento inestable del proceso, pues bien si el operador en algún momento se distrae puede no ajustar la dimensión y entonces producir piezas fuera de especificación.

Desarrollo del estudio Cp y Cpk.

Con los datos obtenidos en la tabla no. 4 se realizó el estudio de Cp y Cpk del proceso, dichos datos fueron introducidos en el software de minitab y ordenados en una sola columna, se le solicitó al software realizar un estudio de capacidad de proceso con los datos, como los datos no siguen una distribución normal se le solicitó al software que realizara una transformación de datos marcando la casilla Box-Cox con el fin de obtener normalidad, los resultados se muestran a continuación en la figura

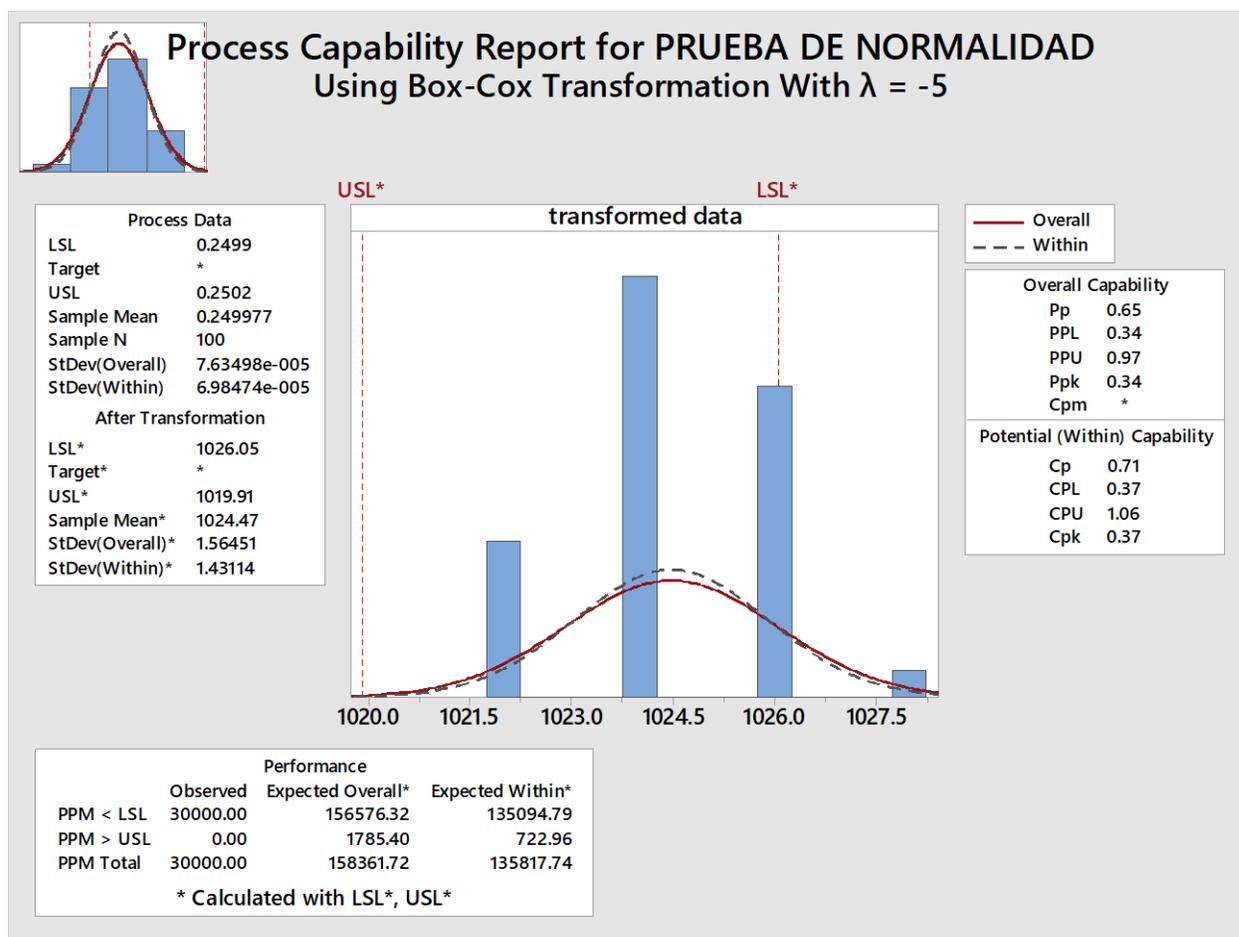


Figura 28. Resultados del 1er análisis de capacidad del proceso de rectificado sin centros.

Como podemos observar en la figura 28 se obtuvo un índice Cp de 0.71 como este índice no cumple con la condición de $C_p \geq 1.33$, no es un proceso con la capacidad adecuada esto quiere decir que estará entregando 158,361.72 PPM (partes por millón) de piezas malas, podemos también observar en la curva que los datos tienen una tendencia hacia abajo o hacia el límite inferior esto nuevamente confirma que los operadores ajustan siempre la dimensión hacia debajo de tal modo que la dimensión de la flecha no suba por arriba de 0.2502".

Se pueden observar en los datos de la tabla no. 4 que los valores de numero 61, 98, y 69 tiene una lectura de 0.2498" por estos 3 datos el software calculo un Cp tan bajo al igual que se puede mirar en la figura 28 el Cpk arrojado es de 0.37 lo cual también es indicador que el proceso no es capaz de producir el 99.7 % de pieza buenas, esto es esperado al ver que hay datos por debajo los límites de especificación.

Como de verificar el estudio del software se realizó un estudio más pero esta vez se asumió que los datos del estudio si siguen un comportamiento normal para verificar las diferencias contra el primer estudio, los resultados se pueden ver en la figura 29.

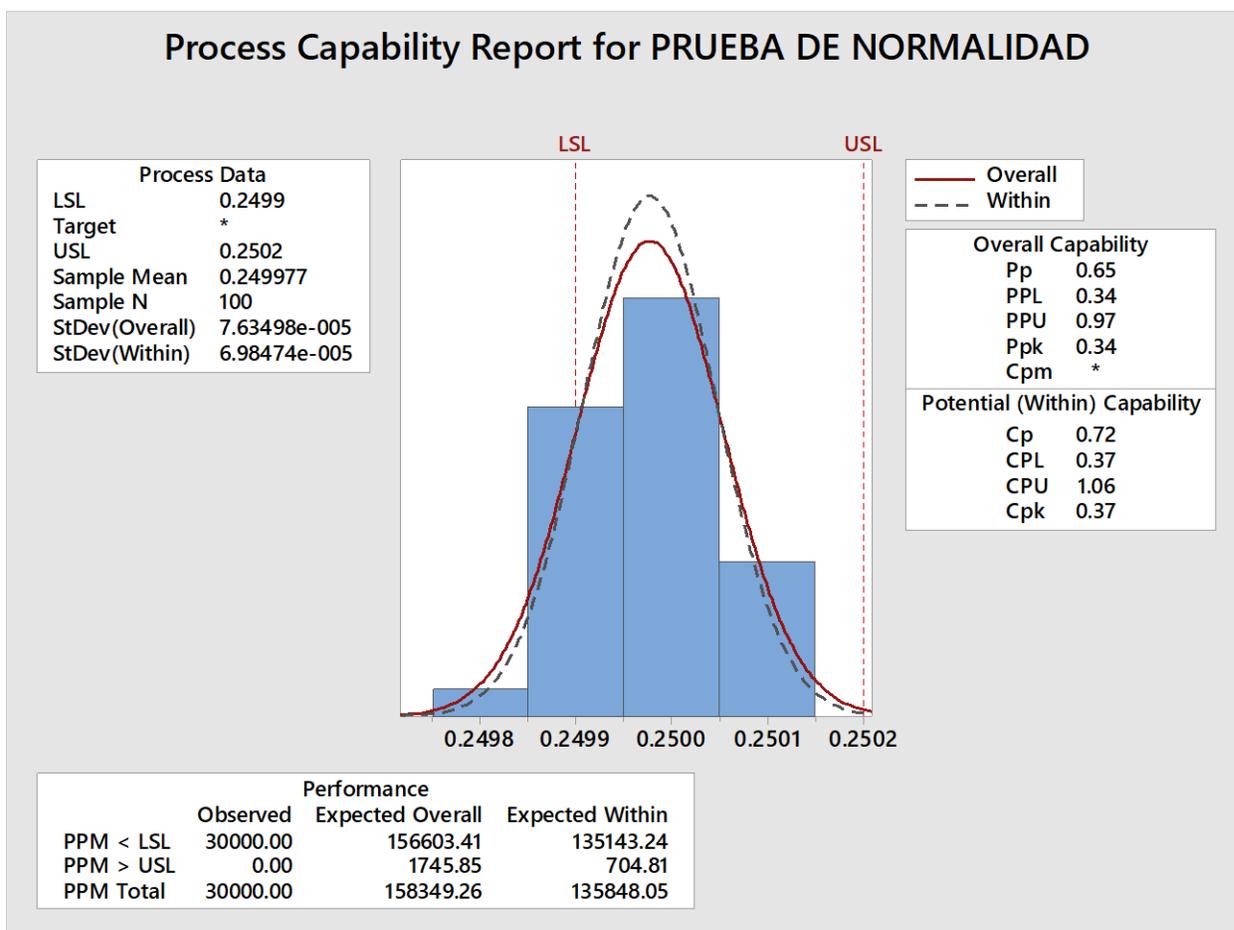


Figura 29. Resultados de estudio de capacidad asumiendo que los datos tienen una distribución normal

Como podemos observar en la figura 29 el resultado del Cp fue de 0.72 y del Cpk 0.37 esta variación es muy poco representativa por lo que se seguirá trabajando con los datos sin normalizar para fines más prácticos. El resultado de Cpk tan bajo tiene su explicación debido a que como se observa los valores de los diámetros están más cargados a la izquierda siendo los valores de 0.2499" y 0.2500" los que más frecuencia presentan, como el índice de Cpk toma en cuenta que tan centrado está el proceso con respecto de la media de los límites de control la cual es de 0.25005" y los valores están

más por debajo de esta medida. El resultado es tan bajo que indica que estaríamos entregando flechas con una dimensión más baja de lo mínimo requerido.

Estudio Cp y Cpk con tolerancias ampliadas.

En el estudio anterior un gran porcentaje de los valores se encuentran sobre el límite inferior 0.2499” y debido a que “el Cp compara el ancho de las especificaciones con la amplitud de la variación del proceso” (Pascal, Pelayo, Serra & Casalins, 2010, p.197). Se obtiene un resultado de Cp muy bajo incluso si cambiamos los valores de las piezas 61, 98, y 69 de 0.2498” a 0.2499” con la intención de que estén dentro de tolerancia, se puede observar en la figura 30 que aun así no alcanza un Cp por arriba de 1, esto debido a que dichos valores están tocando los límites de especificación.

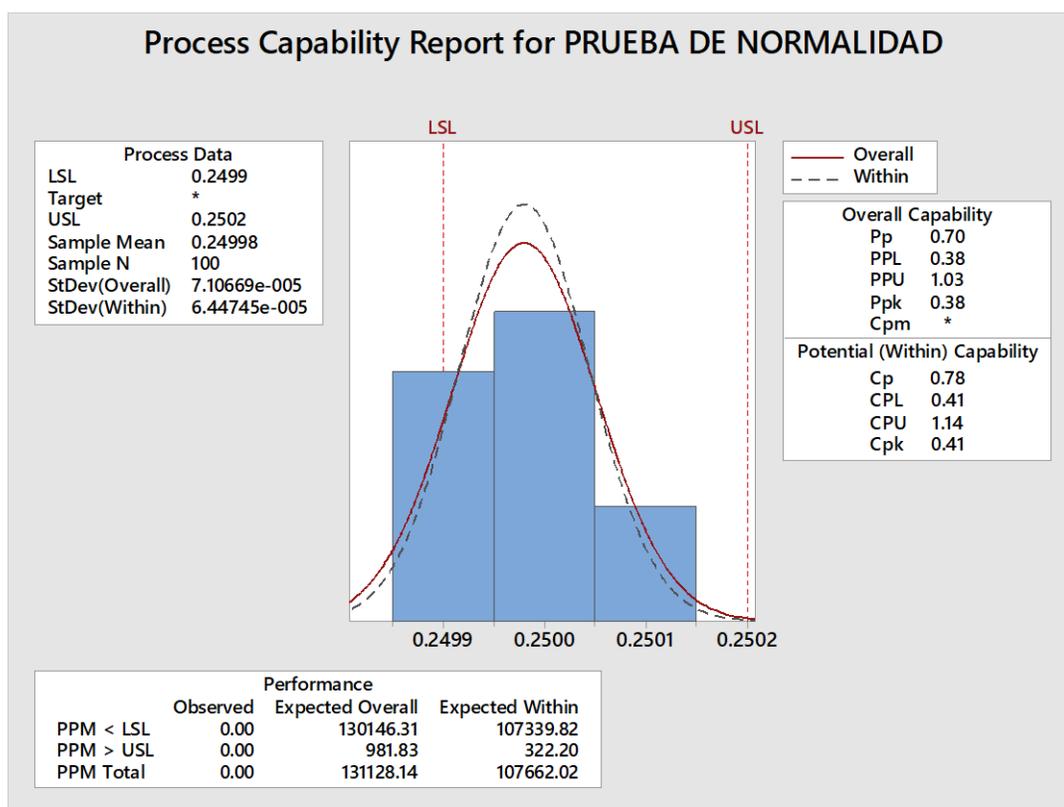


Figura 30. Análisis de capacidad de proceso con todos los valores dentro de especificación.

Con lo antes revisado se procede a realizar una simulación, pero esta vez se propone simular valores con apoyo del software de minitab que cumplan con una media de 0.2501" y una desviación estándar de 0.00001" esto hará que el software genere valores aleatorios dentro de un rango más cerrado por ejemplo valores de 0.25003", 0.25009", 0.25013", esto valores están otorgando un número más en la posición de las cienmilésimas, en la figura 31 se pueden ver los resultados.

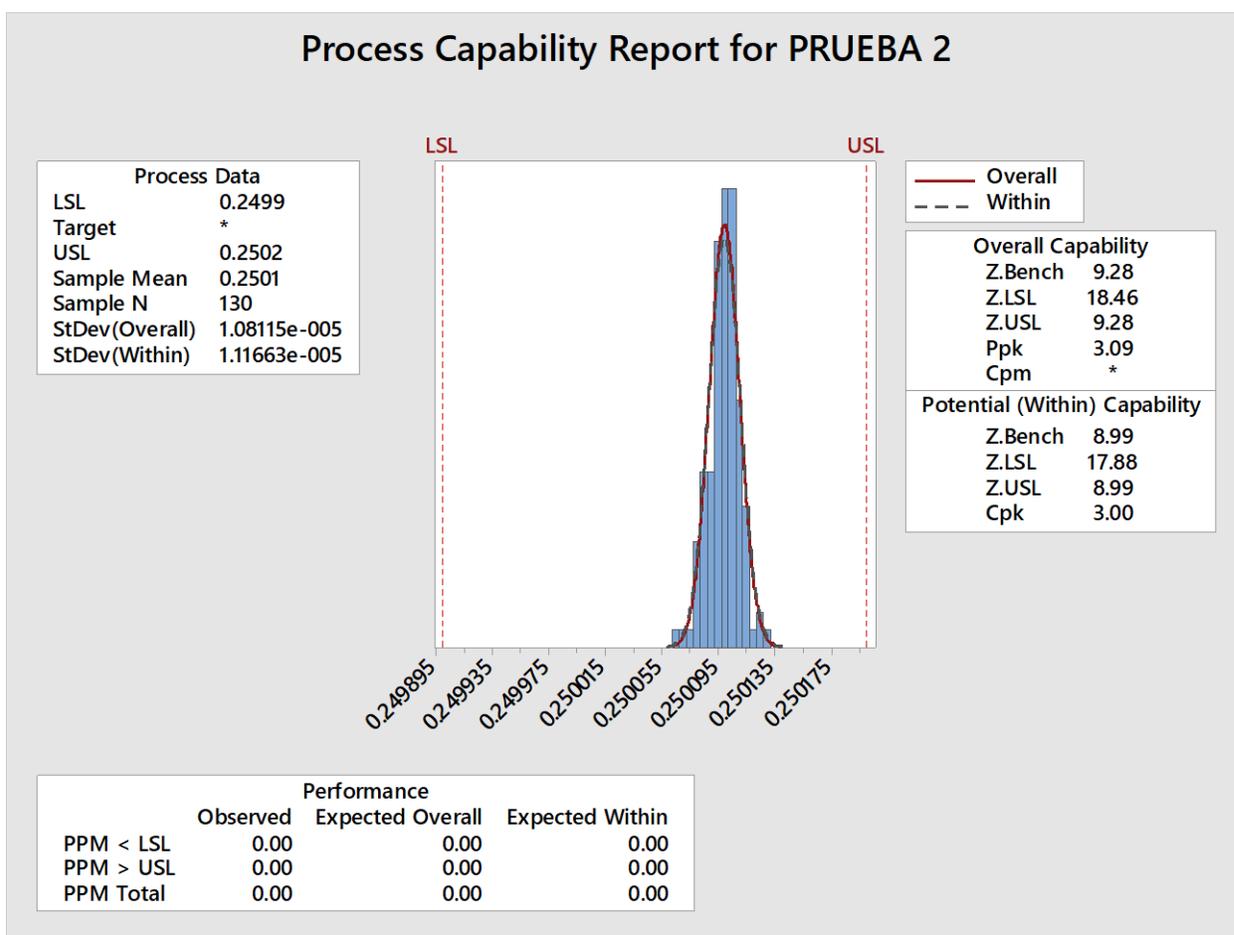


Figura 31. Resultados de Análisis de capacidad con valores simulados hasta en cienmilésimas.

Podemos ver que en esta ocasión el Cpk resultado de 3.00 esto confirmaría que para lograr un Cpk de mínimo 1 tendríamos que poder tener valores de lectura hasta en

cienmilésimas de pulgada, situación que resulta imposible con el instrumento que actualmente se utiliza y las maquinas que realizan la operación de rectificado.

Otra condición que pudiera ayudar a lograr un Cp y Cpk mas alto es ampliar las tolerancias pues como bien se ha visto el proceso es capaz de tener valores dentro de 0.2499" a 0.2502" sin mayor inconveniente sin embargo como ya se ha mencionado al tocar estos valores los límites de especificación el índice de Cp sale muy por debajo de lo esperado.

Se realiza una simulación mas pero esta vez ampliando los límites de especificación hasta 0.2497" a 0.2502" en la figura 32 se pueden ver los resultados.

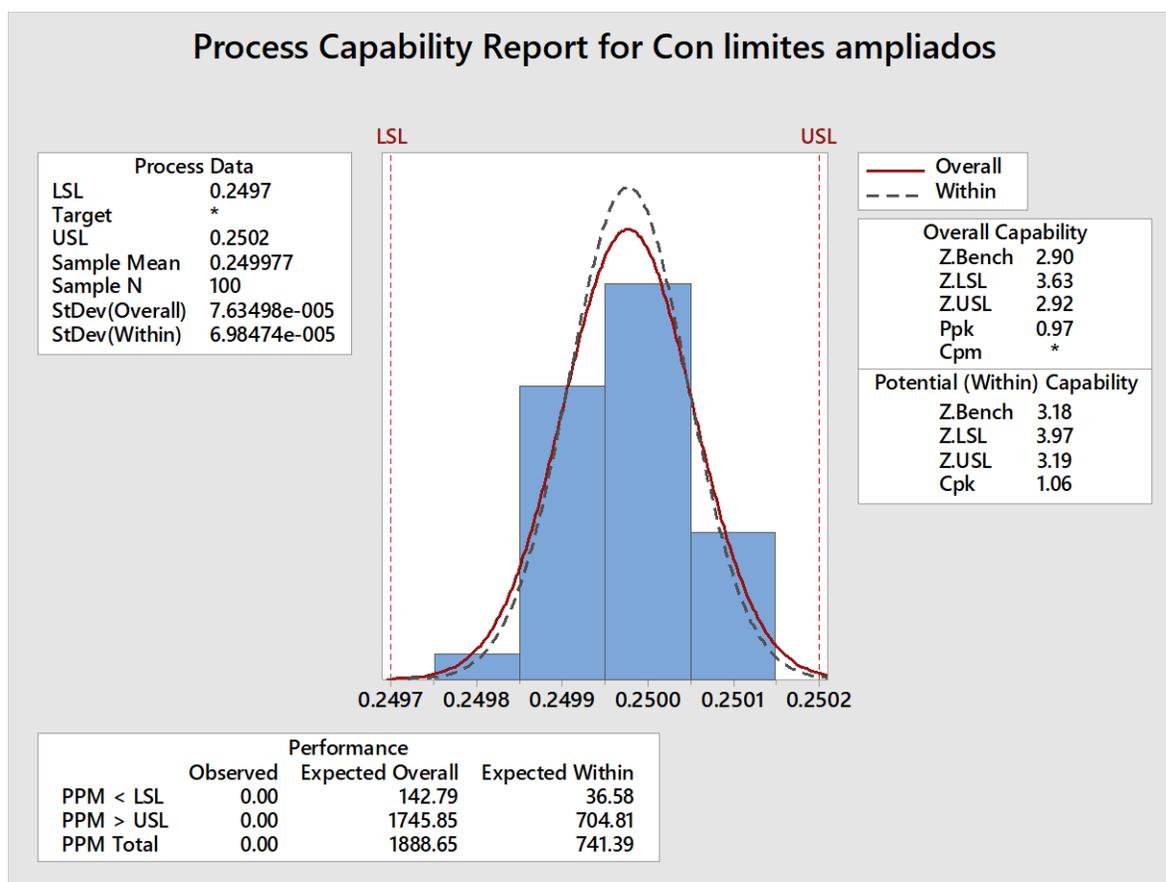


Figura 32. Estudio de Capacidad con rangos ampliados de 0.2497" a 0.2502".

En este estudio se puede observar que el Cpk dio como resultado 1.06, aumento significativamente debido a que los valores ya no están tocando los límites de especificación, aun no alcanza el 1.33 porque los valores no están centrado en la media que debería ser 0.2499", hay más presencia de valores en 0.2500 sin embargo se puede ver una clara tendencia hacia valores menores. Los datos demuestran sin duda que es la mejor opción para cumplir con el objetivo de llevar el proceso de mínimo 1.0 de Cpk los cual su vez aseguraría un proceso estable y capaz de dar piezas en su mayoría dentro de especificaciones.

Capitulo V. Conclusiones y resultados.

Como se pudo observar el método que actualmente se usa para calcular el índice de CP y Cpk del proceso de rectificado sin centros para las flechas de motor, no es el adecuado, pues resulta que nunca se podrá obtener un índice de Cpk ≥ 1.0 por las condiciones antes revisadas, a continuación se presentan los resultados de los objetivos específicos:

1.- Determinar que el sistema de medición usado para revisar las dimensiones del eje rotatorio en el diámetro de la chumacera, balero y cuerpo es el adecuado de tal modo que cumpla máximo con una variación del 10% y con un número de distinción de categorías ≤ 5 , si no cumple averiguar cuál es la causa.

Resultado.

El sistema de medición resulto tener áreas de oportunidad en la repetibilidad y reproducibilidad de los datos, fue necesario determinar que variables afectaban directamente las mediciones y estandarizar el método para que todos los involucrados

midieran de la misma forma, con ello se pudo obtener una mejora en el porcentaje de variación dentro de un rango marginal, esto es debido a que la dimensión a medir tiene una tolerancia demasiado cerrada en lo cual influyen algunas otras variables naturales, como son el medio ambiente, el coeficiente de expansión del acero como materia prima y del mismo instrumento. Estas variables resultan particularmente costosas para poder eliminar, por lo que únicamente se decide trabajar bajo el esquema expuesto en esta investigación.

Recomendaciones.

Se tiene que invertir en tecnología para que las mediciones sean más certeras y el error humano se disminuya. Se puede utilizar un micrómetro de tecnología láser, con el cual no es necesario que la pieza haga contacto para obtener la dimensión, si no que a través de la función de una luz reflectante se obtiene por medio de un software la medición que está tomando el haz de luz, esta tecnología permite que el operador no intervenga en el método de medición, solo basta colocar la pieza en una base y esta hará la lectura. Se solicitó únicamente para fines de la investigación que un proveedor hiciera una demostración del equipo, a continuación se pueden ver las imágenes en la figura 33 y 34.



Figura 33. Se muestra como el láser del micrómetro atraviesa la zona de medición del diámetro de la flecha.



Figura 34. Se muestra un tipo de software capaz de realizar las mediciones del micrómetro por láser en tiempo real.

2.- Identificar si el comportamiento de los datos en las mediciones cumple con una distribución normal por lo tanto deben tener un valor $P > 0.05$, si no cumple examinar cuál es la causa.

Resultado.

Los datos no cumplen con un comportamiento normal debido a 2 condiciones importantes, la primera es que el rectificado es un proceso de desgaste en las piedras que lo realizan lo que provoca que la dimensión vaya creciendo conforme pasa el tiempo este caso en particular generaría un distribución de tipo exponencial y la segunda es porque los operadores del procesos tiene que controlar las dimensiones de las flechas esta característica es una causa asignable a la variabilidad del proceso, esto provoca que cada operador ajuste en base a su experiencia, conocimiento, estado de ánimo, la dedicación y atención que prestan al trabajo en cuestión. La primera condición no se puede eliminar puesto resulta propio de un proceso de rectificado y la segunda se puede solo con el uso de máquinas con una mejor tecnología y manipuladas por controles numéricos automatizados.

Recomendaciones.

De acuerdo con las simulaciones echas se recomienda asumir un comportamiento normal de los datos pues como se pudo observar en la comparación no hay un cambio significativo comparando con datos transformados por el método de Box-Cox y datos sin transformar, también se pudo demostrar que el incumplimiento de índice de Cpk no está relacionado directamente con la consecuencia de que los datos no sean normales.

Se puede suponer que los datos presentarían un comportamiento normal si la muestra n aumenta significativamente a largo del tiempo y además analizando los datos de forma separada por operador.

3.- Determinar la capacidad real del proceso de acuerdo a los índices C_p y C_{pk} para las dimensiones en el diámetro de la chumacera, de no cumplir averiguar la causa.

Resultados.

El C_{pk} real del proceso a la fecha en que se tomaron los datos resultó de 0.37 un índice muy bajo para fines de calidad del producto, la causa de esta condición son atribuibles a situaciones en particular que no tienen relación con la forma en que el proceso está trabajando, la primera de ellas es porque el instrumento utilizado no es capaz de dar lecturas de 0.00001" si esto fuera posible como se comprobó, se tendría una mejor capacidad de ajuste en las piezas para poder moverse mejor en los rangos de 0.2499" a 0.2502", sin embargo esto resulta particularmente complicado y aun así se tendría que evaluar si las máquinas actuales pueden tener ajustes tan cerrados para poder cumplir. La segunda condición es el rango tan cerrado de especificación puesto que resulta de solo 3 cifras de diezmilésimas esto provoca que el centro sea la cifra de en medio y que haya valores siempre pegados hacia los límites de especificación a la izquierda y derecha, al cumplir con esta característica es imposible que el cálculo del C_{pk} de un resultado favorable.

Recomendaciones.

Como se comprobó lo más adecuado es ampliar el rango de tolerancias de 0.2497" a 0.2502" con esto se puede cumplir con la condición de un C_{pk} mínimo de 1.0 y es más

fácil controlar el proceso con un rango mayor. Se recomienda hacer pruebas de vida en los motores para verificar que dicha tolerancia no genera un desgaste mayor y de ser aceptable cambiar la especificación.

Para el objetivo no.4 ya se han dado las recomendaciones en cada caso para poder alcanzar un Cpk de 1.0.

Conclusión.

El proceso de rectificado no fue analizado desde un principio para evaluar si las condiciones de las máquinas y los instrumentos de medición eran capaces de dar las tolerancias requeridas en los diámetros de la pieza, tampoco el método estadístico usado para evaluar los índices de Cp y Cpk fue debidamente revisado para ver si realmente estaba adecuado a las necesidades del proceso. El método estadístico actual no es el más adecuado para las dimensiones y tolerancias requeridas, se deben ampliar las tolerancias para que puedan ser cumplidas con las máquinas y tener una calidad adecuada.

Los procesos de rectificado requieren de una alta precisión para obtener el acabado deseado en las superficie de las piezas, es por ello que resulta de suma importancia que los métodos de medición sean los apropiados de acuerdo a las dimensiones y tolerancias requeridas, para este tipo de procesos cuando son realizados en serie la mejor opción es contar con un sistema de control estadístico para las dimensiones críticas, esto con el fin de garantizar la calidad de las piezas fabricadas, pero resulta particularmente que este sistema sea explícitamente analizado para que se usen los métodos más correctos de acuerdo a la necesidades, desde el principio o diseño del

proceso se tienen que analizar todos las premisas necesarias para validar que las especificaciones se pueden cumplir, de lo contrario se deberán adecuar a los recursos que se tienen disponibles o invertir en máquinas con mayor tecnología e instrumentos de medición con una precisión y exactitud mayor capaz de dar mejores resultados. Esta tesis sirve como guía para poder revisar los procesos de rectificado que ya existen o procesos nuevos que requieran una precisión tan estrecha.

Bibliografía

- [1]. Escamilla Esquivel, A. (2014). *Metrología y sus aplicaciones*. Grupo Editorial Patria.
- [2]. Meza Sánchez, S. y Zárate, J. J. (2012). *Metrología geométrica*. Grupo Editorial Éxodo.
- [3]. Gallardo Rodríguez, F. L. (2012). *Técnicas de mecanizado y metrología (UF1213)*. IC Editorial.
- [4]. Meza Sánchez, S. y Zárate, J. J. (2017). *Metrología dimensional aplicada en elementos mecánicos*. Grupo Editorial Éxodo.
- [5]. Argüelles Ojeda, J. L. (2018). *Proyectos Seis sigma: el camino a la excelencia operacional*. Editorial Reverté.
- [6]. Herrera Acosta, R. J. (2012). *Seis Sigma: métodos estadísticos y sus aplicaciones*. B - EUMED.
- [7]. Pascal O., et al. (2010). *Introducción a la Ingeniería de Calidad*. Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
- [8]. Carro Paz R., Gonzales Gómez D. (sin fecha), *Control Estadístico de Procesos*. Universidad Nacional De Mar Del Plata.
- [9]. Carro R. & González D. (2016) *Administración de la Calidad Total*. Argentina: Facultad de Ciencias Económicas y Sociales.
- [10]. Barrios, F. (2007). *Administración de la calidad total para un mejoramiento continuo de los servicios en el Instituto Politécnico Nacional*. Tesis de Licenciatura. Universidad Pedagógica Nacional.
- [11]. Socconini L. (2015) *Certificación Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios*. Marge Books.
- [12]. AIAG. (2010) *Análisis del Sistema de Medición MSA*. AIAG.
- [13]. Botticini G. (2011). *Rectificado, Desbaste y Tronzado*. Editorial Alsina.
- [14]. Salazar C., Del Castillo S. (2018). *Fundamentos Básicos de Estadística*. Sin ed.

Tablas y Figuras.

Tabla 1. Los índices Cp, Cpi y Cps en términos de la cantidad de piezas malas.	10
Tabla 2. Otras formas conocidas de llamar a las causas comunes y especiales.....	20
Tabla 3. Factores para calcular acotamientos 3 sigmas para la gráfica X y la gráfica R.....	33
Tabla 4. Datos en pulgadas tomados del diámetro de la chumacera de una muestra de 100 flechas.	45
Tabla 5. Distribución de operadores y auditores por turno.....	48
Tabla 6. Resultado de las mediciones.....	52
Tabla 7. Datos del Ø de la pista de chumacera aplicando las nuevas condiciones.....	57
Figura 1. Proceso de rectificado sin centros.	14
Figura 2. Distribución Normal de un proceso con variaciones naturales.	22
Figura 3. Representación gráfica de causas de variación asignables en un proceso.....	22
Figura 4. Representación gráfica de la posición de la posición de las desviaciones estándar en la campana de Gauss.....	29
Figura 5. Representación de una gráfica de control para medir la variación de los pesos en una pieza cualquiera.	30

Figura 6. Representación gráfica de procesos que tienen situaciones anormales en el comportamiento de las muestra en el comportamiento de las muestras. Imagen replicada del artículo Control Estadístico de los Procesos, Autores; Roberto C. Paz & Daniel G. Gómez.....	31
Figura 7. Fórmula para calcular los límites de control en una gráfica de Rangos.....	32
Figura 8. Fórmulas para calcular los límites de control de un grafica de medias \bar{X}	34
Figura 9. Representación gráfica para observar las diferentes combinaciones entre precisión y exactitud.....	36
Figura 10. Zonas de medición en el diámetro del cuerpo de la flecha indicada con líneas punteadas rojas.....	44
Figura 11. Zonas de medición en el diámetro de la chumacera de la flecha indicada con líneas punteadas rojas.....	44
Figura 12. Zonas de medición en el diámetro de la chumacera de la flecha indicada con líneas punteadas rojas.....	44
Figura 13. Prueba de normalidad Anderson-Darling, diámetro de chumacera.....	46
Figura 14. Grafica de frecuencias de valores para los diámetros de chumacera.	47
Figura 15. Imagen de un micrómetro de exteriores con rango de 0” a 1”	49
Figura 16. Base para sujetar micrómetro estándar.....	50
Figura 17. Micrómetro apoyado en base para poder tomar lecturas correctamente.	51
Figura 18. Resumen del Gage R&R #1 realizado en Minitab.	53
Figura 19. Reporte de variación en Gráficos en Minitab.....	54
Figura 20. Flecha para motor, con indicación de donde se debe tomar la lectura del diámetro de la pista de chumacera	56
Figura 21. Partes de un micrómetro estándar, se indica la zona de apriete llamada trinquete.	56
Figura 22. Resumen de resultados del 2do estudio R&R aplicando las nuevas condiciones.	57
Figura 23. Gráficas de resultados de 2do gage R&R.....	58
Figura 24. Gráficos de probabilidad de distribuciones conocidas	60
Figura 25. Gráficos de probabilidad de distribuciones conocidas	60
Figura 26. Gráficos de probabilidad de distribuciones conocidas	61
Figura 27. Gráficos de probabilidad de distribuciones conocidas	61
Figura 28. Resultados del 1er análisis de capacidad del proceso de rectificado sin centros.	64
Figura 29. Resultados de estudio de capacidad asumiendo que los datos tienen una distribución normal	66
Figura 30. Análisis de capacidad de proceso con todos los valores dentro de especificación.	67
Figura 31. Resultados de Análisis de capacidad con valores simulados hasta en cienmilésimas. 68	
Figura 32. Estudio de Capacidad con rangos ampliados de 0.2497” a 0.2502”.	69
Figura 33. Se muestra como el láser del micrómetro atraviesa la zona de medición del diámetro de lo flecha.....	72
Figura 34. Se muestra un tipo de software capaz de realizar las mediciones del micrómetro por láser en tiempo real.	72