

Implantación de la Carta \bar{X} -R para el Control del Runout Radial en Engranés Diferenciales

\bar{X} -R Chart Implantation for Radial Runout Control of Differential Gears

Norberto Gómez-López ^a
Tecnológico Nacional de México, México
norberto.gomez@itcolima.edu.mx

Recibido: 08 marzo 2024
Aceptado: 24 junio 2024

Miguel Escamilla-López
Tecnológico Nacional de México, México

Jesús Francisco Tejeda-Castrejón
Tecnológico Nacional de México, México

Emma Ofelia Fajardo-Núñez
Tecnológico Nacional de México, México

José de Jesús Amezcua-Vivas
Tecnológico Nacional de México, México

Resumen:

En el presente trabajo se muestran las etapas que se siguieron para la implantación del Control Estadístico de Procesos (CEP), en una empresa fabricante de engranes y piñones diferenciales para la industria automotriz; específicamente se implantó la carta de control \bar{X} -R-R en el proceso de torneado de un modelo de engranes con el objetivo de mejorarlo, ya que los resultados de las mediciones del runout radial, mostraban evidencia contundente de inestabilidad, generando bajas capacidades de proceso con índices $Cpk=0.74$ y $Z=2.21$.

Después de tres meses de implantada la carta \bar{X} -R-R, los resultados muestran que el proceso de torneado no presenta patrones anormales y se mantiene estable, con lo cual también se ha mejorado significativamente su capacidad, ya que las últimas mediciones del runout radial de los engranes, muestran que se han alcanzado índices de capacidad $Cpk=1.12$ y $Z=3.35$.

Palabras clave: Engrane, torneado, runout radial, carta de control, límite de control.

Abstract:

This work shows the stages that were followed for the implementation of Statistical Process Control (SPC), in a company that manufactures differential gears and pinions for the automotive industry; Specifically, the \bar{X} -R-R control chart was implemented in the lathing process of a gear model with the objective of improving it, since the results of the radial runout measurements showed conclusive evidence of instability, generating low process capacities with indices $Cpk=0.74$ and $Z=2.21$.

After three months of implementing the \bar{X} -R card, the results show that the turning process does not present abnormal patterns and remains stable, which has also significantly improved its capacity, since the latest measurements of the radial runout of the gears, show that capacity indices $Cpk=1.12$ and $Z=3.35$ have been reached.

Keywords: Gear, turning, radial runout, control chart, control limit.

Introducción

Vivimos en un mundo donde casi todas las actividades cotidianas están regidas por la competencia; la sociedad humana compite en educación, deportes, economía, ciencia, tecnología y otros campos, como producto del afán del ser humano de ser cada vez mejor día con día. Lo mismo sucede con las organizaciones productoras de bienes y servicios; desde siempre han tratado de ser mejores que sus competidoras, buscando siempre técnicas

Notas de autor

^a Autor de correspondencia. E-mail: norberto.gomez@itcolima.edu.mx

y herramientas para que sus procesos sean cada vez más competitivos, puedan cumplir con los requerimientos de calidad establecidos por sus clientes y alcanzar la mejora continua.

El sector automotriz es hoy en día uno de los más competidos; el resultado de esta competencia constante ha sido tanto la desaparición de empresas completas, como el éxito de otras que han encontrado estrategias para lograr y hasta superar las expectativas de calidad y productividad requeridas por sus clientes internos y externos. Sin embargo, el camino al éxito está lleno de dificultades, empezando por la necesaria cultura de la calidad del personal, así como su capacitación en la elaboración, manejo e interpretación de herramientas y técnicas para la mejora y optimización de los procesos. Existen muchas técnicas y herramientas estadísticas para el control de la calidad y la mejora continua de los procesos productivos, algunas existen desde hace más de medio siglo, pero por falta de capacitación o desconocimiento de éstas, aun no son utilizadas en muchas empresas; una de estas técnicas es el CEP o SPC (por sus siglas en inglés).

En 1924 Walter A. Shewhart de la Bell Telephone Laboratories, desarrolló el concepto de cartas de control estadístico, que suele considerarse como el inicio formal del CEP; la cartas de control son una técnica muy útil para el monitoreo continuo de procesos, ya que cuando los promedios muestrales graficados se encuentran fuera de los límites de control (LC), significa que existen fuentes inusuales de variabilidad en el proceso, por lo que debe hacerse una investigación con el fin de aplicar acciones correctivas para reducir esa variabilidad [1]. De acuerdo con esto, se busca que el resultado de todo proceso se vea reflejado en la calidad del producto, logrando la satisfacción del cliente; se puede asumir entonces, que lo que se necesita es establecer buenas bases estadísticas para que los procesos arranquen y se mantengan funcionando de manera adecuada, después solo es necesario elegir las herramientas que permitirán poco a poco llevarlos a la mejora continua.

El presente proyecto para la implantación de la carta de control \bar{X} -R en un proceso de producción de engranes, se desarrolló de abril a noviembre de 2023 en una empresa fabricante de engranes y piñones diferenciales para la industria automotriz, ubicada en la ciudad de Silao Guanajuato, cuyo cliente principal es una marca automotriz internacional; por razones de confidencialidad no es posible mencionar su nombre.

Fundamentos Teóricos

El CEP o SPC, es una técnica estadística usada ampliamente para asegurar que los procesos cumplan con los estándares de calidad. Todos los procesos están sujetos a cierto grado de variabilidad, la cual se debe a causas naturales y causas asignables; las cartas de control son una herramienta simple pero poderosa para separarlas e identificarlas eficientemente [2].

El CEP incluye una serie de cartas de control, que se han utilizado durante décadas en la industria de todo el mundo, las cuales se muestran a continuación; las primeras cuatro se aplican a características del tipo continuo (mediciones), mientras que las tres restantes a características del tipo discreto (conteos) [3]:

- Carta de medias y rangos (\bar{X} -R).
- Carta de medias y desviación estándar (\bar{X} -S).
- Carta de medianas y rangos (\bar{X} -R).
- Carta de precontrol.
- Carta de fracción defectiva (p).
- Carta de número de defectos (np).
- Cartas de defectos por unidad (c, u).

La carta \bar{X} -R se aplica a procesos que producen grandes cantidades de productos o partes, donde la característica de calidad de interés es de tipo continuo o mediciones. En realidad, son dos cartas que se deben analizar juntas: la carta \bar{X} y la carta R; mediante la primera se controla la tendencia central de la característica y mediante la segunda se controla su variabilidad [4].

Los límites de una carta de control no son las especificaciones, tolerancias o requisitos del cliente; estos se calculan a partir de la variación de los datos que se presentan en la carta. De esta forma, la clave está en establecer los límites para cubrir cierto porcentaje de la variación natural del proceso; para calcularlos, se debe actuar de forma tal que, bajo condiciones de control estadístico, los datos que se grafican en la carta tengan una alta probabilidad de caer dentro de esos límites. Por lo tanto, una forma de proceder es encontrar la distribución de probabilidad de la característica de interés, estimar sus parámetros y ubicar los límites de manera que un alto porcentaje (99.73%) de la muestra esté dentro de estos; también se conocen como límites de probabilidad. Cuando no se conocen la media (μ) ni la desviación estándar (σ) del proceso, se calculan como sigue [5]:

Carta \bar{X} :	$LCS = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R}$	(1)
	$LC = \bar{\bar{X}}$	(2)
	$LCI = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R}$	(3)
Carta R:	$LCS = D_4\bar{R}$	(4)
	$LC = \bar{R}$	(5)
	$LCI = D_3\bar{R}$	(6)

Donde:

LCS = Límite de control superior.
 LC = Línea central.
 LCI = Límite de control inferior.
 $\bar{\bar{X}}$ = Media de las medias de los subgrupos.
 \bar{R} = Media de los rangos de los subgrupos.
 A_2, D_3, D_4 = Constantes que dependen del tamaño de los subgrupos.

A_2, D_3, D_4 = Constantes que dependen del tamaño de los subgrupos. Si un proceso normal está en control estadístico, el 99.73% de las partes fabricadas estará comprendida entre $\mu - 3\sigma$ y $\mu + 3\sigma$. El parámetro μ depende del punto en el que se centra el proceso; sin embargo, σ depende del número y de las causas comunes de su variabilidad y por lo tanto, es intrínseca a este; 6σ es la variabilidad natural del proceso o capacidad del proceso. Uno de los indicadores más utilizados para medir la capacidad, es el índice Cpk que se calcula como sigue; se define como un proceso capaz aquel cuyo Cpk > 1 [6].

$$Cpk = \text{mínimo} \left[\frac{ES - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - EI}{3\sigma} \right] \quad (7)$$

Otra forma de medir la capacidad de un proceso es mediante el índice Z, el cual consiste en calcular la distancia entre las especificaciones y la media μ del proceso en unidades de desviación estándar. De esta manera, para un proceso con doble especificación se tiene un índice Z superior (Z_s) y un índice Z inferior (Z_i), que se definen de la siguiente manera [7]:

$$Z_s = \frac{ES - \mu}{\sigma} \quad (8)$$

$$Z_i = \frac{\mu - EI}{\sigma} \quad (9)$$

La capacidad de un proceso medida mediante el índice Z, es igual al valor más pequeño de Zs y Zi; es decir:

$$Z = \text{mínimo} [Z_i, Z_s] \quad (10)$$

Materiales y Métodos

La empresa produce engranes y piñones diferenciales para la industria automotriz; el modelo de engrane con número de parte E300-1965, es el que requiere el cliente principal de la empresa y el de mayor volumen de producción de los engranes, por lo cual se mantiene una línea de producción exclusiva para este modelo.

El torneado es una de las etapas críticas en la línea de producción de engranes y piñones. El torneado es un proceso mecanizado para fabricar partes cilíndricas, en el cual la herramienta de corte se mueve de forma lineal mientras la pieza de trabajo gira, el torneado reduce el diámetro de una parte a una dimensión especificada y le da un acabado liso [8].

El runout es una de las características de calidad críticas en la fabricación de partes cilíndricas y es determinada en el proceso de torneado. El runout (oscilación), es la medición de imperfecciones en un eje giratorio, el cual idealmente debería ser redondo (runout radial) o plano (runout axial); el runout se mide durante o después de la fabricación o reparación de un eje rotativo [9].

El runout radial se refiere a la variación en la distancia radial entre la superficie de la parte giratoria y su eje central; generalmente se mide a una distancia específica del eje de rotación y afecta la redondez de la pieza mecanizada. Esencialmente, el descentramiento radial es la desviación de una forma circular verdadera que experimenta una pieza giratoria durante su rotación, esta desviación puede hacer que la superficie giratoria se acerque o se aleje del eje central a medida que gira, lo que genera una condición de deformación, las causas del runout radial son muy variadas; algunas de estas pueden ser las siguientes [10]:

- Producción masiva de manera continua.
- Desgaste de la herramienta de corte.
- Desalineación del husillo.
- Mala sujeción de la parte.
- Mala sujeción del portaherramientas.
- Desbalanceo.
- Vibración de la herramienta de corte.

la Figura 1 muestra en qué consiste y cómo se mide el runout radial [11]. La especificación del cliente para los engranes con número de parte E300-1965, es de 0.100 mm como máximo; esta es una tolerancia del tipo “S” (el valor más pequeño es el mejor), donde el valor nominal u objetivo es de cero ($m=0.000$) [12]. La medición del runout radial en estos engranes, se realiza en el diámetro externo del muñón del engrane, a esta característica de calidad la llaman comúnmente: “Runout de diámetro de muñón contra el nido”.

Su medición se utiliza con el instrumento LCMF-0179 (gauge para la medición de runout radial); consta de una montura con soporte giratorio o nido para el engrane y un indicador digital. El método de medición consiste en colocar el engrane sobre el nido dentado de la montura, después se acerca el indicador digital hasta tocar la superficie externa del muñón y se oprime el botón “SET 0” para iniciar la medición desde 0.000 mm, finalmente se gira el nido en su propio eje 360° o más, para que el indicador digital marque la medición del runout radial del diámetro externo del muñón contra el nido; la lectura registrada por el indicador es el valor que se toma como medición del runout radial del engrane [12].

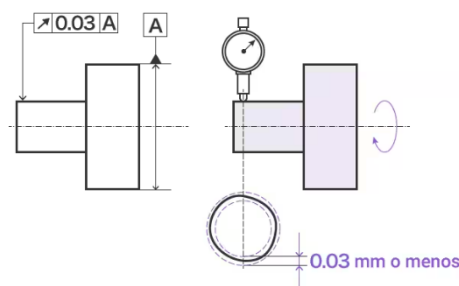


FIGURA 1.

En que consiste y como se mide el runout radial en un eje giratorio

Fuente: [11].

El problema. Las mediciones del runout radial de los engranes con número de parte E300-1965, estaban arrojando muchos valores cercanos al límite de especificación y algunos fuera de este; cuando esto último sucedía, se tomaban acciones correctivas para corregir la desviación, pero estas las mediciones solo se registraban y no se les realizaba ningún tipo de análisis. Por esta razón, se decidió implantar una carta de control en el proceso de torneado, con el objetivo de tomar acciones preventivas para su control y mejora; la carta \bar{X} -R es la adecuada para controlar este proceso, porque esta se aplica a procesos que producen grandes cantidades de partes, donde la característica de calidad de interés es de tipo continuo, que es el caso del proceso de torneado y el runout radial de los engranes. Las etapas que se siguieron para este proyecto de mejora se muestran en la Figura 2.

Un análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) evalúa la precisión de un sistema de medición; se utiliza para investigar el error producido por sus dos componentes y permite fijar la variabilidad intrínseca del sistema de medición, que es difícilmente controlable. En otras palabras, compara la variación de los componentes del sistema de medición con su variación total y con su tolerancia [13]. Así, en la primera etapa, se realizó un análisis de R&R al sistema de medición del runout radial de los engranes, con el fin de verificar la confiabilidad de las mediciones; los resultados para 10 partes, 3 operadores y 3 mediciones a cada parte ($10 \times 3 \times 3 = 90$ mediciones), mostraron que el sistema es excelente, ya que el índice de precisión/tolerancia ($I_{p/\tau}$) para el indicador Gage R&R total fue menor al 10%, que es lo deseable.

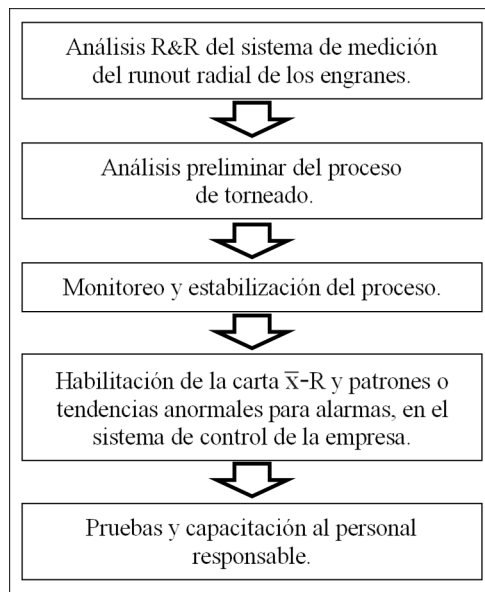


FIGURA 2.
Etapas que se siguieron para la implantación de la carta de control \bar{X} -R.
Fuente: propia.

En la segunda etapa se realizó el análisis preliminar del proceso, para lo cual se procedió a la toma de la muestra; aquí se decidió con base al volumen de producción tomar las mediciones del runout radial de 4 engranes cada 30 minutos para 30 subgrupos; es decir, 30 subgrupos de tamaño 4. Posteriormente se procedió a obtener la carta \bar{X} -R con los límites de control preliminares, con base a las ecuaciones 1 a la 6, así como los índices de capacidad del proceso, con base a las ecuaciones 7 a la 10, utilizando el software para estadística Minitab, los resultados se muestran en las Figuras 3 y 4.

La carta \bar{X} -R preliminar de la Figura 3, muestra patrones anormales, ya que en ambas gráficas se observan límites de control bastante amplios para el runout radial; de 0.0207 a 0.1008 en el caso de la gráfica \bar{X} -R y de 0.0000 a 0.1255 en el caso de la gráfica R, se observa que en ambas gráficas el LCS rebasa el límite de especificación de 0.1000. También se observa que en la gráfica R, dos terceras partes de los puntos se encuentran por arriba de la LC, lo que indica inestabilidad y alta variabilidad del proceso de torneado. Lo anterior generaba baja capacidad del proceso, con índices $C_{pk}=0.74$ y $Z=2.21$ como se observa en la Figura 4; lo más grave de todo, era que no se estaba cumpliendo el requisito de procesos con $C_{pk}>1.00$, que el cliente impone a sus proveedores, con lo cual también se corría el riesgo de la suspensión del contrato de producción.

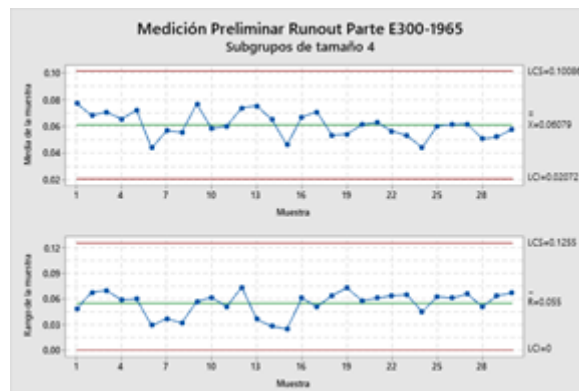


FIGURA 3.
Carta \bar{X} -R para análisis preliminar del runout.
Fuente: propia.

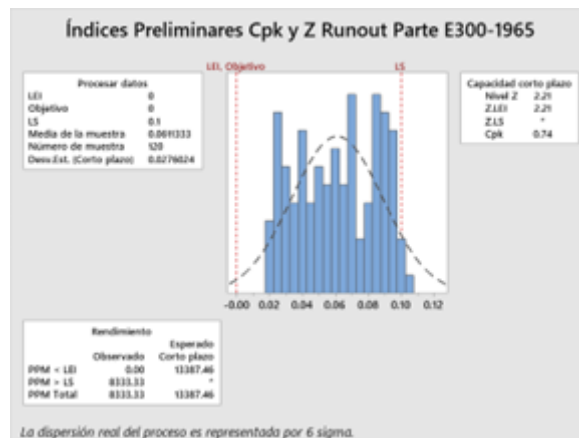


FIGURA 4.
Índices de capacidad preliminares del runout.
Fuente: propia.

En la tercera etapa, se continuó monitoreando el proceso mediante la toma continua de muestras para su análisis mediante la carta \bar{X} -R; conforme el proceso se fue estabilizando poco a poco como producto de su constante monitoreo y ajuste, así como la toma de acciones preventivas, los LC fueron ajustándose y la capacidad del proceso fue mejorando. Las últimas mediciones antes de la implantación de la carta \bar{X} -R, dieron como resultado un proceso estable sin patrones anormales, así como los LC e índices de capacidad mostrados en la Tabla 1.

Si los datos reflejan que el proceso está en control estadístico tanto en lo referente a variabilidad como a la tendencia central, entonces estos límites se continuarán usando para analizar el proceso en tiempo real, de tal forma que en cuanto se tomen los datos se sabrá si el proceso sigue operando bajo un estado de control estadístico o no [14]; en consecuencia, los LC mostrados en la tabla 1, fueron tomados para implantar la carta \bar{X} -R.

TABLA 1
Límites de control y capacidad del proceso una vez estabilizado.

LIMITE	CARTA \bar{X}	CARTA R
LCS	0.08017	0.07766
LC	0.05537	0.03403
LCI	0.03058	0.00000
Cpk= 1.08		Z= 2.95

Fuente: proceso de producción de la empresa.

En la cuarta etapa se habilitó en el sistema interno de control de la empresa, la carta \bar{X} -R con los LC mostrados en la tabla 1, así como los patrones anormales que generan condiciones no estables del proceso, como condición para la activación de alarmas; para esto fue necesario dividir la carta de control en seis zonas o bandas iguales, cada una con una amplitud similar a una desviación estándar de los datos que se grafican. Algunos patrones de comportamiento anormal de los puntos en una carta de control, que indicarán que el proceso es inestable y que está funcionando con causas especiales o asignables de variación son [15]:

1. Desplazamiento o cambio en el nivel de proceso.
2. Tendencias en el nivel de proceso.
3. Ciclos recurrentes (periodicidad).
4. Mucha variabilidad.
5. Falta de variabilidad (estratificación).

Ya que se tiene una tolerancia del tipo “S”, donde el valor objetivo para el runout radial de los engranes es cero ($m=0.000$), para la habilitación de las alarmas en el sistema solo se consideraron los patrones que tendieran a acercarse al LCS, que representan un pronóstico de un valor fuera de especificación, así como el patrón de mucha variabilidad; específicamente se habilitaron o se adaptaron los siguientes patrones, con el fin de verificar y ajustar el proceso de torneado, para tomar acciones preventivas oportunamente:

- 8 o más puntos consecutivos por arriba de la LC.
- 10 de 11 puntos consecutivos por arriba de la LC.
- 12 de 14 puntos consecutivos por arriba de la LC.
- 5 puntos consecutivos en ascenso.
- 5 de 6 puntos consecutivos en ascenso.
- 6 de 7 puntos consecutivos en ascenso.
- 8 puntos consecutivos en ambos lados de la LC, pero ninguno en la zona C.

Finalmente, en la etapa seis se procedió a las pruebas y adecuaciones necesarias, así como a la capacitación al personal responsable de monitorear el proceso.

Resultados y discusión

Después de tres meses de implantada la carta \bar{X} -R, con los LC normalizados que se muestran en La Tabla 1, se tomaron mediciones del runout radial de los engranes para 30 subgrupos de tamaño 4. La carta \bar{X} -R obtenida se muestra en la Figura 5, donde se observa que el proceso se mantiene estable, ya que no presenta

patrones anormales de inestabilidad; así mismo, en la Figura 6 se muestran los nuevos índices de capacidad del proceso $Cpk=1.12$ y $Z=3.35$, con lo cual se cumple con el requisito del cliente.

Conclusiones

La carta \bar{X} -R, demostró ser una herramienta muy poderosa para la mejora y el control del proceso de producción de engranes del modelo con número de parte E300-1965; se alcanzó el objetivo planteado, ya que se mejoraron significativamente los índices Cpk y Z del proceso y también se redujo la distancia entre el LCI y el LCS de las gráficas \bar{X} y R, alejando este último del límite de especificación (0.1000); esto a su vez permitió acercar la media del proceso al valor objetivo ($m=0.000$), en un 9.8%, así como mejorar su variabilidad, reduciendo la desviación estándar en 39.3%.

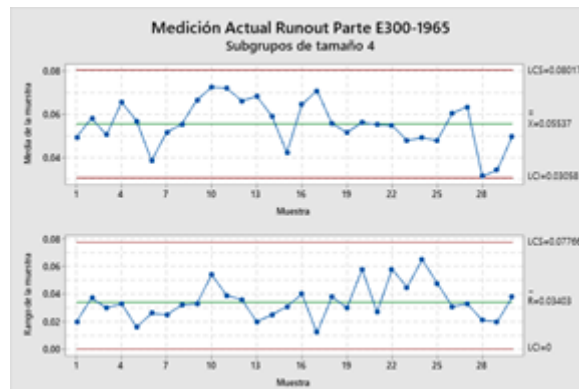


FIGURA 5.

Carta \bar{X} -R después de implantada con los límites de control mostrados en la tabla 1.

Fuente: propia.

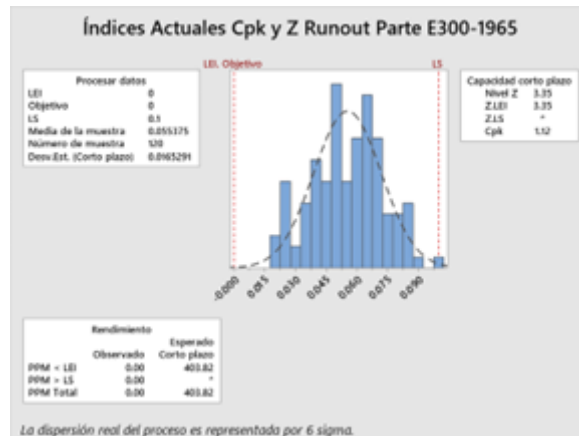


FIGURA 6.

Índices Cpk y Z después de Implantada la carta \bar{X} -R.

Fuente: propia.

Conforme este sistema de control vaya madurando y mejorando con el tiempo, puede ser posible reducir aún más la distancia entre el LCI y el LCS del proceso, así como mejorar sus índices de capacidad, su tendencia central y su variabilidad. Sin embargo, esto dependerá del grado de atención que se le preste de parte del personal responsable del proceso de torneado ya que, para lograrlo es necesario un monitoreo continuo para evitar la nueva generación de patrones anormales que indiquen inestabilidad del proceso. Si lo anterior se

lleva a la práctica, seguramente a mediano plazo, el proceso de torneado seguirá mejorando y si esto sucede, los LC se deberán ajustar también.

Finalmente, se recomienda incorporar al sistema todos los patrones de anomalía conocidos, con el fin de consolidar la implantación de la carta \bar{X} -R y lograr mejores resultados en el menor tiempo posible. También se recomienda extender la implantación el CEP a los procesos en los que se tengan más problemas, mediante la carta de control adecuada.

Referencias

- [1]. Buzzi, A. (2023), "*Walter A. Shewhart: el padre del control estadístico de la calidad*", Revista de Adecra+Cedim, de gestión de la salud, <https://adecra.s3.amazonaws.com/biblioteca/2023/12/Shewhart.pdf>
- [2]. Heizer, J. y Render, B. (2009), "*Principios de Administración de Operaciones*", Editorial Pearson-Prentice Hall, 7ª edición, México, p. 222.
- [3]. González, C. (1991), "*Control de Calidad*", Editorial McGraw Hill, 1ª edición, México, p. 201.
- [4]. Gutiérrez, H. (1997), "*Calidad Total y Productividad*", editorial McGraw Hill, 2ª edición, México, p. 198.
- [5]. Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2009), "*Control de Calidad y Seis Sigma*", editorial McGraw Hill, 2ª edición, México, p. 187.
- [6]. Juárez, V. et al. (2018), "*Análisis de Capacidad de Proceso en la Manufactura de Antenas de Televisión*", Revista Electrónica sobre Cuerpos Académicos y Grupos de Investigación, vol. 5, número 10. <https://www.cagi.org.mx/index.php/CAGI/article/view/176/348>
- [7]. Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2009), "*Control de Calidad y Seis Sigma*", editorial McGraw Hill, 2ª edición, México, p. 109.
- [8]. Mazak, Máquinas y Tecnología, "*Torneado*", <https://www.mazakusa.com/es/machines/process/turning/>
- [9]. Hofmann - Intelligent Balancing Solutions, "*Control del Runout*", consultado en marzo/2024. <https://www.hofmann-global.com/es/productos/equipos-portatiles-de-equilibrado/control-de-runout.html#>
- [10]. PRO-LEANTECH, (2023), "*Mastering Runout in Precision Machining*", <https://proleantech.com/es/guide-to-runout-in-precision-machining/>
- [11]. Keyence, "*Fundamentos GD&T*", imágenes <https://www.keyence.com.mx/>
- [12]. Grupo AAM, S.A., (2020), "*Procedimiento de Medición del Runout Radial en engranes*", Manual de Instrumentación, pp. 31-33.
- [13]. Escamilla, M. et al., (2020), "*Repetibilidad y Reproducibilidad en las Mediciones del Espesor de Tubos de Acero para Ferroducto*", Revista Conciencia Tecnológica, I.T. de Ags, núm. 59.
- [14]. Gutiérrez, H. (2010), "*Calidad Total y Productividad*", editorial McGraw Hill, 3ª edición, México, p. 228.
- [15]. Gutiérrez, H. (2010), "*Calidad Total y Productividad*", editorial McGraw Hill, 3ª edición, México, pp. 198-203.



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94481870008>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Norberto Gómez-López, Miguel Escamilla-López,
Jesús Francisco Tejeda-Castrejón,
Emma Ofelia Fajardo-Núñez, José de Jesús Amezcua-Vivas
**Implantación de la Carta X-R para el Control del Runout
Radial en Engranajes Diferenciales**
**X-R Chart Implantation for Radial Runout Control of
Differential Gears**

Conciencia Tecnológica
núm. 67-B, p. 70 - 79, 2024
Instituto Tecnológico de Aguascalientes,
ISSN: 1405-5597