

# Recopilar mediciones 3D fiables El enfoque en la metrología 3D inteligente



**Recopilar mediciones  
3D fiables | El enfoque  
en la metrología  
3D inteligente**

**Entendiendo los conceptos  
básicos del MSA**

Definición del sistema  
de medición

Índices de rendimiento del  
sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento  
del sistema de medición

Incertidumbre expandida

**Cómo elegir la metodología  
adecuada para evaluar la  
incertidumbre de los  
sistemas de medición 3D  
complejos**

**Realización de estudios de  
MSA utilizando la  
metodología experimental  
y software de metrología  
3D inteligente**

- Estudios de repetibilidad
- Estudios de R&R de galgas

**Recomendaciones para  
metrólogos**

**Conclusión**

# Recopilar mediciones 3D fiables

## El enfoque en la metrología 3D inteligente

Las empresas de fabricación monitorean la calidad del producto todos los días mediante la recopilación de datos de mediciones dimensionales. Estos datos se utilizan para investigar la estabilidad de un proceso de fabricación, determinar la capacidad del proceso para garantizar la calidad y funcionalidad de la pieza, y establecer índices para cuantificar la capacidad del proceso para cumplir los requisitos dimensionales. Todo forma parte de su proceso de mejora continua.

Al introducir un nuevo proceso de fabricación, es posible que se perciban problemas con la estabilidad del proceso sin poder identificar su causa y corregirlos. En algunos casos, estos problemas no están relacionados con el proceso de fabricación sino con el propio sistema de medición.

Los metrologos saben que una medición nunca es exacta. Una multitud de fuentes de variación afectan el rendimiento del sistema de medición, lo que genera incertidumbre en la medición. Al realizar un Análisis del sistema de medición (MSA) con estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) de galgas, se puede calcular la variación del sistema de medición. Estos estudios les permiten a los metrologos evaluar la validez del sistema de medición y minimizar los factores que contribuyen a la variación total del proceso medido que en realidad se derivan del sistema de medición.

Un estudio de MSA puede ser bastante complejo de configurar y ejecutar, incluso más en el contexto de la metrología 3D, y requiere un amplio conocimiento de la estadística para obtener datos procesables.

### Este libro blanco:

- Explicará los conceptos clave de Análisis del sistema de medición y su aplicación práctica para los dispositivos de medición 3D.
- Explorará un proceso totalmente digital desde la configuración y ejecución de estudios de repetibilidad y de R&R de galgas para obtener resultados directamente en Excel para analizarlos y compartirlos, y
- Les hará recomendaciones a los metrologos para analizar los resultados del estudio.



Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente

### Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

### Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

### Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

Estudios de repetibilidad

Estudios de R&R de galgas

### Recomendaciones para metrologos

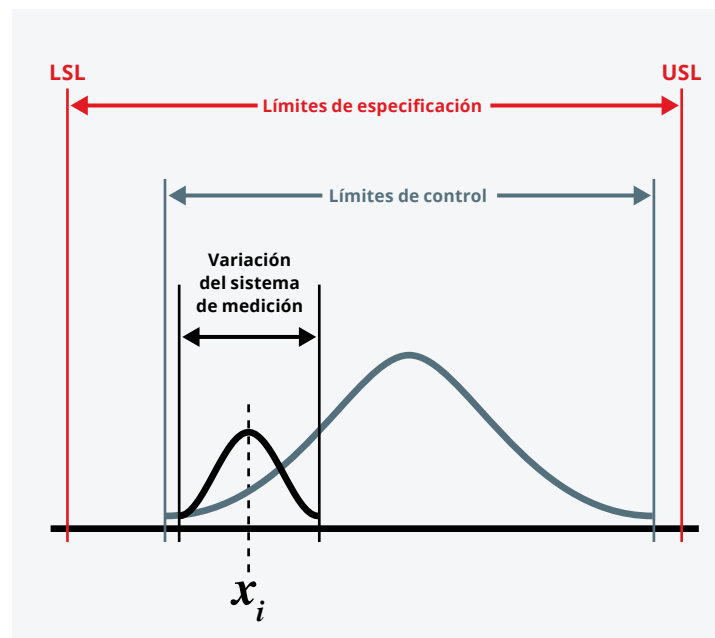
### Conclusión

# Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Examinemos el papel crucial del MSA en el contexto del proceso de inspección de piezas en general. Durante este proceso, los metrólogos miden *características clave*, como tamaño, dimensiones, posiciones, perfiles y orientaciones, para determinar su desviación de las especificaciones nominales. Evalúan el cumplimiento de las especificaciones técnicas, según se plantean en el plan de control, mediante tolerancias y requisitos. Cada medición se caracteriza por dos componentes principales: uno que representa la desviación real (es decir, el valor real) y otro que refleja la variabilidad del sistema de medición. Para garantizar que su sistema de medición sea fiable y veraz para la tarea, los metrólogos deben identificar la amplitud de la variación del sistema de medición y asegurarse de que represente un máximo del 10% al 30% de los límites de especificación. La variabilidad o el rendimiento del sistema de medición debe ser suficientemente pequeño proporcionalmente para que no contribuya significativamente a la variación total del proceso medido, considerando tanto la variación del proceso de fabricación como del sistema de medición, y no saque al proceso fuera de las tolerancias ni de los límites (*LSL*, *USL*) de especificación.

**Figura 1**  
Rendimiento de un sistema de medición en cuanto a la variación total del proceso

La Figura 1 muestra esta interacción, donde el rendimiento de un sistema de medición y los valores medidos ( $x_i$ ) tienen una contribución relativamente discreta y predecible a la variación del proceso medido. Esta variación se obtiene a partir de los resultados medidos en las piezas que vienen de la línea de producción utilizando técnicas de SPC. Normalmente, los límites de control se calculan utilizando estos datos. En otras palabras, el rendimiento del sistema de medición afecta los resultados de la variación total del proceso medido, y el flujo de trabajo del análisis del sistema de medición ayuda a identificar este rendimiento.



Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente

## Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

## Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

Estudios de repetibilidad

Estudios de R&R de galgas

Recomendaciones para metrólogos

Conclusión

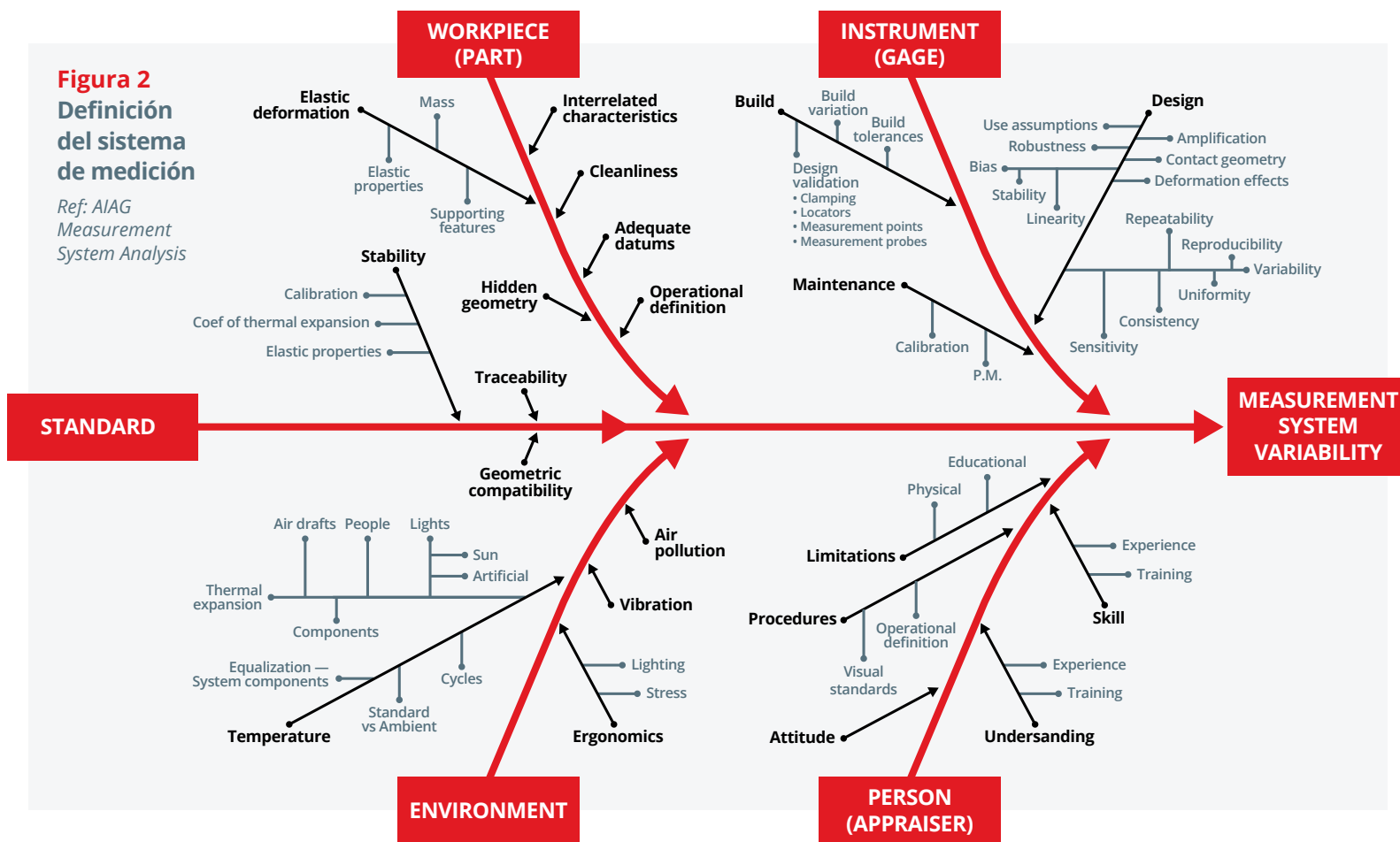
## Definición del sistema de medición

Antes de determinar el rendimiento del sistema de medición, es fundamental identificar todas las posibles fuentes de variación que pueden afectar el proceso de medición de una característica clave. El **Grupo de Acción de la Industria Automotriz (AIAG)** establece que el sistema de medición se compone de “la colección de instrumentos o galgas, estándares, operaciones, métodos, accesorios, software, personal, entorno y supuestos

utilizados para cuantificar una unidad de medida o fijar la evaluación a la característica de la entidad geométrica que se está midiendo; el proceso completo que se usa para obtener las mediciones”. El MSA debe considerar todos estos factores, como se detalla en la Figura 2, ya que influyen en la incertidumbre del sistema de medición en general.

**Figura 2**  
Definición del sistema de medición

Ref: AIAG  
Measurement  
System Analysis



Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente

Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incetidumbre expandida

Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejoss

Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

Estudios de repetibilidad

Estudios de R&R de galgas

Recomendaciones para metrólogos

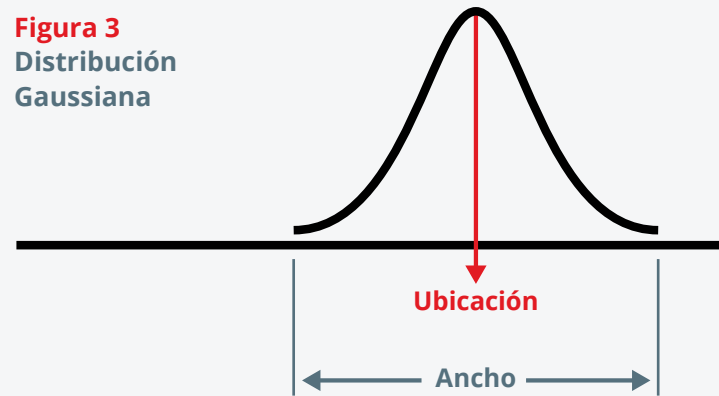
Conclusión

## Índices de rendimiento del sistema de medición

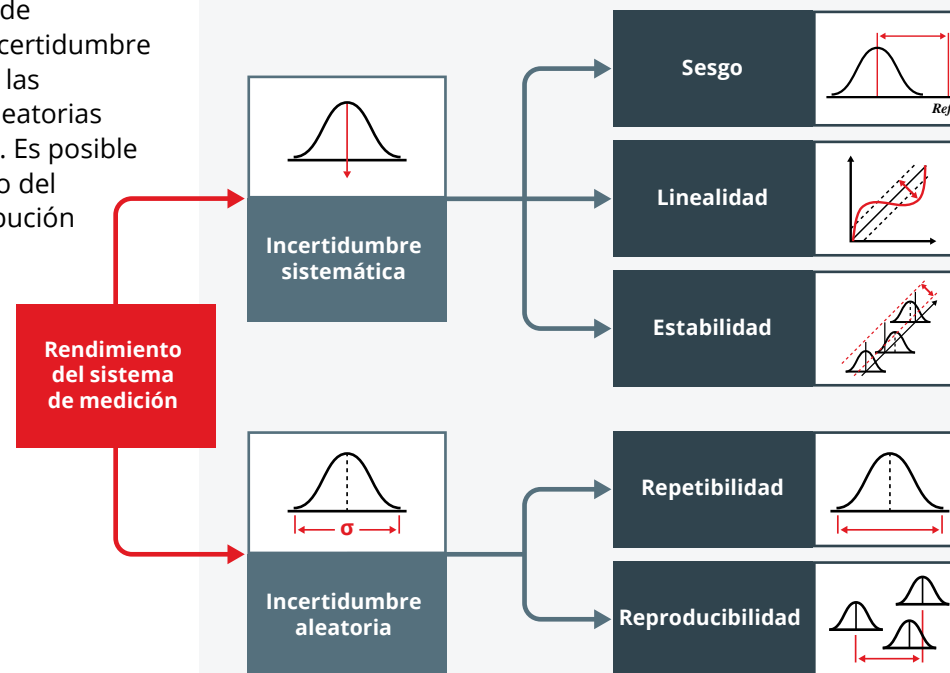
El rendimiento de un sistema de medición se determina utilizando índices que categoricen y cuantifiquen la incertidumbre de la medición. Al recopilar datos sobre el proceso, el metrólogo puede cuantificar la variabilidad total de la medición determinando un comportamiento específico asociado con ella. Por lo general, este comportamiento se describe como una variable aleatoria (RV) con una distribución Gaussiana (normal). La Figura 3 ilustra este concepto, en la curva negra se representan los datos recopilados, es decir, los valores medidos que surgen del proceso de medición, y su distribución se define por la ubicación (promedio) y los parámetros de ancho (*desviación estándar*).

Los múltiples factores que afectan el proceso de medición representan múltiples fuentes de incertidumbre que son sistemáticas (por ejemplo, el valor de las mediciones promedio contra el valor real) o aleatorias (por ejemplo, el diferencial de las mediciones). Es posible categorizar estas incertidumbres dependiendo del efecto que tienen en los parámetros de distribución identificados. Como se ilustra en la Figura 4, la incertidumbre sistemática incluye el sesgo, la linealidad y la estabilidad, mientras que la incertidumbre aleatoria incluye la repetibilidad y la reproducibilidad. Cada categoría se puede identificar claramente por su patrón de distribución único.

**Figura 3**  
Distribución  
Gaussiana



**Figura 4**  
Índices  
de rendimiento



Recopilar mediciones  
3D fiables | El enfoque  
en la metrología  
3D inteligente

### Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema  
de medición

Índices de rendimiento del  
sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento  
del sistema de medición

Incertidumbre expandida

### Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

Realización de estudios de  
MSA utilizando la  
metodología experimental  
y software de metrología  
3D inteligente

- Estudios de repetibilidad
- Estudios de R&R de galgas

Recomendaciones para  
metrólogos

Conclusión

### • Incertidumbre sistemática

La incertidumbre sistemática es la incertidumbre en las mediciones que se relaciona estrechamente con la posición de la distribución normal en cuanto a una referencia conocida. Matemáticamente, influye en el valor promedio de los datos medidos. El término común para esto es *error de precisión*. El error de precisión representa la exactitud entre el promedio de uno o más resultados medidos y un valor de referencia. El error de precisión generalmente es reproducible y a menudo se debe a problemas que podrían cuantificarse y corregirse. Los tres tipos de la incertidumbre sistemática son sesgo, linealidad y estabilidad, siendo el sesgo el más común. El *sesgo* representa la distancia entre el promedio de uno o más resultados medidos ( $\bar{x}$ ) y un valor de referencia (*Ref*). Matemáticamente, el sesgo se calcula por la diferencia entre el valor real (*Ref* value) y el promedio observado de las mediciones en la misma característica de la misma pieza. Por otro lado, la *linealidad* indica qué tanto concuerdan los datos recopilados en todo el rango de medición de un instrumento con el valor de referencia. Es la diferencia de sesgo en todo el rango de medición previsto del equipo. La *linealidad* representa el cambio en el sesgo de un extremo del rango de medición al otro. El último tipo de incertidumbre sistemática es la *estabilidad*. Representa la capacidad de un sistema de medición para mantener su capacidad metrológica a lo largo del tiempo. La estabilidad describe la variación del sesgo a lo largo del tiempo, normalmente el tiempo entre dos calibraciones del sistema.

### • Incertidumbre aleatoria

La otra fuente de incertidumbre en las mediciones es la incertidumbre aleatoria, comúnmente llamada error de precisión. El error de precisión representa las fluctuaciones estadísticas en los datos medidos a consecuencia de las limitaciones del sistema de medición. El error de precisión describe la variación que se espera en las mediciones repetidas a lo largo del rango de medición. Los dos tipos de incertidumbre aleatoria son la repetibilidad y la reproducibilidad. La repetibilidad representa el ancho de la dispersión de las mediciones obtenidas bajo un conjunto de condiciones muy controladas. Describe la capacidad del sistema para obtener la misma medición, con el mismo equipo, la misma pieza, la misma plantilla y las mismas condiciones ambientales. Una distribución estrecha indica una medición más repetible. La reproducibilidad representa la variación entre mediciones realizadas por diferentes operadores, con el mismo equipo y bajo las mismas condiciones. Matemáticamente, esta es la variación en el promedio de las lecturas que toma cada uno de los operadores.



Recopilar mediciones  
3D fiables | El enfoque  
en la metrología  
3D inteligente

### Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema  
de medición

Índices de rendimiento del  
sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento  
del sistema de medición

Incertidumbre expandida

### Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

Realización de estudios de  
MSA utilizando la  
metodología experimental  
y software de metrología  
3D inteligente

- Estudios de repetibilidad
- Estudios de R&R de galgas

### Recomendaciones para metrólogos

### Conclusión

## Capacidad y rendimiento del sistema de medición

La capacidad de un sistema de medición ( $\sigma_{\text{capacidad}}$ ), también llamada *incertidumbre estándar total*, es la combinación de todas las incertidumbres sistemáticas y aleatorias. Cuantifica la duda asociada con una medición bajo condiciones conocidas y se utiliza para identificar la incertidumbre total del sistema de medición a lo largo de un breve periodo. La capacidad se puede calcular usando la fórmula:

$$\sigma_{\text{capacidad}}^2 = \sigma_{\text{Sesgo (linealidad)}}^2 + \sigma_{R\&R}^2$$

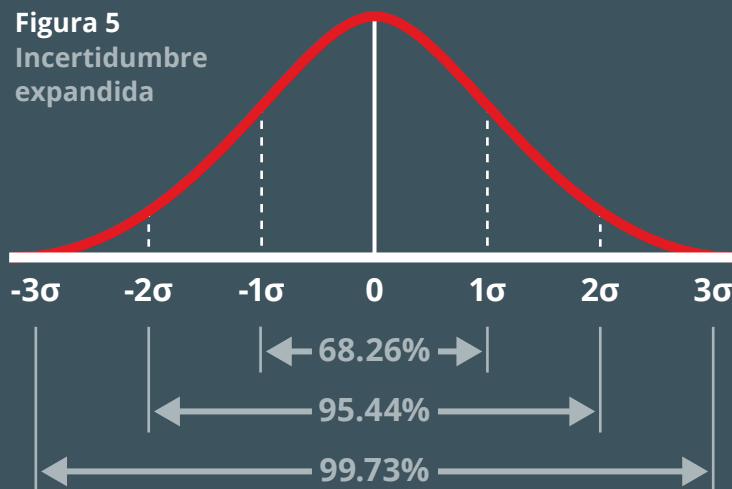
Por otro lado, el rendimiento no solo considera las fuentes de las variaciones sistémicas y aleatorias sino también las fuentes de deriva que ocurren a lo largo del tiempo. Se calcula usando la fórmula:

$$\sigma_{\text{rendimiento}}^2 = \sigma_{\text{capacidad}}^2 + \sigma_{\text{stabilidad}}^2$$

## Incertidumbre expandida

El último paso del Análisis del sistema de medición determina la *incertidumbre expandida* ( $U$ ) asociada al sistema de medición. La incertidumbre expandida representa el valor de incertidumbre de medida total que describe, dentro de un nivel de confianza específico, el rango que se espera que contenga el resultado real de la medición obtenida por un sistema. Puede expresarse como:  $U = \pm K\sigma_{\text{tot}}$  donde  $U$  es la incertidumbre expandida,  $K$  es el factor de cobertura que representa el área bajo la curva normal para un nivel de confianza deseado (por ejemplo,  $K=3$  para un nivel de confianza del 99.73 %), y  $\sigma_{\text{tot}}$  es la incertidumbre estándar total de el sistema de medición que suele corresponder a su rendimiento. Los factores de confianza más utilizados durante el análisis del sistema de medición se encuentran en la siguiente figura.

Figura 5  
Incertidumbre expandida



Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente

### Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

- Estudios de repetibilidad
- Estudios de R&R de galgas

Recomendaciones para metrologos

Conclusión

# Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

Para evaluar la incertidumbre de medición de un sistema, primero se debe definir su modelo de medición. Este modelo es una representación matemática de la relación entre la cantidad de los resultados del sistema de medición y las cantidades de entrada que se sabe que intervienen en el proceso de medición. Existen dos tipos de medición: directa e indirecta, y esto afectará la forma en que se define el modelo. Una medición directa es cuando un dispositivo de medición proporciona directamente la cantidad del resultado. Por ejemplo, un diámetro externo ( $Y$ ) se mide utilizando un micrómetro, que proporciona directamente el valor físico  $X$ . En este caso, el modelo de medición (es decir, la función) se identifica como  $Y=X$ . Sin embargo, la mayoría los dispositivos de medición 3D realizan mediciones indirectas. No pueden proporcionar directamente el valor ( $Y$ ), sino que consideran una función de varios ( $n$ ) valores físicos ( $X_i$ ),  $Y=f(X_1,...,(X_n)$ . Por ejemplo, una CMM portátil usa la posición y orientación de múltiples codificadores para obtener un resultado específico. Estos valores físicos, en este ejemplo la posición y la orientación de los codificadores que se usan para calcular la cantidad del resultado, se ven afectadas por una incertidumbre de medición específica ( $u_{x_i}$ ). Por lo tanto, el resultado medido que da el brazo ( $Y$ ) depende del conjunto de valores ( $X_i$ ) y las incertidumbres asociadas ( $u_{x_i}$ ) que se utilizaron para el cálculo. Por último, el valor medido ( $Y$ ) también tiene una incertidumbre total ( $u_y$ ).

Si el modelo que representa el sistema de medición se formula explícitamente, podría usarse para propagar las incertidumbres de las cantidades de entrada a las cantidades resultantes usando dos estrategias: una serie de Taylor o una simulación de Monte Carlo. Estas estrategias se abordan en profundidad en publicaciones como la [\*Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones\* \(GUM\)](#)<sup>1</sup>. Por otro lado, **si el modelo es demasiado complejo para formularlo explícitamente o cuando se desconocen los parámetros, se debe utilizar una estrategia experimental**. Es posible calcular la incertidumbre total del sistema de medición analizando la cantidad del resultado usando herramientas estadísticas. Por ejemplo, en una situación en la que un metrologo utiliza una CMM portátil con un escáner para medir el perfil de una superficie, la función de medición es mucho más compleja de identificar. En este caso, se debe utilizar un análisis experimental. Dado que se realiza directamente sobre los resultados de la medición, el metrologo no tiene que desglosar el sistema de medición completo, lo que lo hace más sencillo, más directo y más fácil de entender.

<sup>1</sup> Evaluación de los datos de medición-Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones (JCGM 100:2008) publicada por la Oficina Internacional de Pesos y Medidas

Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente

## Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática

- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

## Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

Estudios de repetibilidad

Estudios de R&R de galgas

Recomendaciones para metrologos

Conclusión

# Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

Realizar un análisis experimental para determinar la incertidumbre expandida de los sistemas de medición 3D complejos requiere que primero se realice un estudio de repetibilidad seguido de un estudio completo de R&R de galga. Al recopilar datos sobre los resultados de las mediciones del sistema utilizando diferentes configuraciones y pruebas, el metrólogo puede calcular la variación total utilizando los índices de rendimiento descritos anteriormente. Pero estos estudios tradicionalmente son complejos de realizar y requieren un amplio conocimiento de la estadística para obtener resultados adecuados.

**Figura 6**  
**PolyWorks MSA barra de herramientas**



PolyWorks® ofrece una solución integrada de software de metrología 3D inteligente de MSA para realizar estudios de sistemas de medición 3D complejos dentro de un proceso completamente digital. Les permite a los usuarios:

- 1 Especificar las características clave requeridas por el plan de control;
- 2 Crear el estudio seleccionando su tipo y definiendo los parámetros clave, que son esenciales para el control de calidad y la trazabilidad;
- 3 Ejecutar el estudio realizando la adquisición de datos para todas las configuraciones del dispositivo y contextos de medición 3D, dentro de una sola plataforma de software universal;
- 4 Producir informes ricos en información publicados directamente en Microsoft Excel con hojas de cálculo preformateadas vinculadas a datos de inspección 3D inteligentes; y
- 5 Realizar análisis sofisticados en Excel sin necesidad de conocimientos avanzados en aplicaciones de software de estadística.

Desde la configuración de los estudios hasta la adquisición de mediciones y los resultados generados automáticamente, como índices y gráficos, la solución de MSA de PolyWorks garantiza que todos los cálculos se realicen dentro de un ecosistema de software y la cadena completamente digital garantiza la integridad de los datos y resultados confiables.

**Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente**

## Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

## Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

## Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

- Estudios de repetibilidad
- Estudios de R&R de galgas

## Recomendaciones para metrólogos

## Conclusión

## Estudios de repetibilidad



El primer paso para realizar un análisis de un sistema de medición es un estudio de repetibilidad. Evalúa la variabilidad de los sistemas de medición (variación del equipo) cuando se ven afectados por un número mínimo de fuentes de variación. Se utiliza durante la evaluación inicial de un

sistema de medición para comparar rápidamente diferentes configuraciones del sistema, como las ubicaciones de sujeción de los accesorios o los parámetros del hardware de metrología.

Un estudio de repetibilidad se realiza:

- 1 - Colocando una pieza en un accesorio (cuando corresponde);
- 2 - Midiendo la pieza utilizando un dispositivo de medición 3D;
- 3 - Retirando la pieza del accesorio; y
- 4 - Repitiendo estos pasos de una a tres veces, siempre usando la misma pieza, el mismo accesorio y el mismo dispositivo de medición.

Utilizando el plan de control, el metrólogo identifica las características clave sobre las que se debe realizar el análisis estadístico. La pieza se mide como mínimo 10 veces, pero generalmente al menos 30 veces, a fin de obtener un buen cálculo de la variación del equipo. Este tipo de estudio generalmente lo realiza un metrólogo sénior que tiene la experiencia necesaria para detectar rápidamente problemas en el proceso de medición y resolverlos fácilmente.

Existen dos tipos de estudios de repetibilidad:

### Tipo 1 Estudio de galga<sup>2</sup> :

- Evalúa el efecto del sesgo y la repetibilidad en las mediciones
- Requiere una referencia certificada de dimensiones conocidas
- Brinda dos métricas: Cg and Cgk
- Se aplica cuando hay una referencia certificada disponible, y la estabilidad del sistema de medición no es un problema

### Estudio de R de galga<sup>3</sup> :

- Evalúa la repetibilidad y la estabilidad del sistema de medición
- No requiere ninguna referencia certificada
- Usa el gráfico I-MR como base para la evaluación de la variación y la estabilidad

La principal diferencia entre ellos es que el estudio Tipo 1 necesita una referencia certificada para ayudar a identificar un posible sesgo y no evalúa la estabilidad del sistema de medición.

**Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente**

### Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

**Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos**

**Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente**

Estudios de repetibilidad

Estudios de R&R de galgas

**Recomendaciones para metrólogos**

**Conclusión**

<sup>2</sup> Requisitos de análisis del sistema de medición para la cadena de suministro de motores aeronáuticos (AS13003) publicado por SAE International

<sup>3</sup> Análisis del sistema de medición (MSA) publicado por el Grupo de acción de la industria automotriz (AIAG).

Ambos estudios de repetibilidad se facilitan con la solución de MSA de PolyWorks:

- 1 - El metrólogo es guiado paso a paso en los pasos necesarios del estudio con la creación de un proyecto de inspección completo con todas las medidas requeridas, sus características, controles y métricas de resultados, así como el número de piezas a medir, con lo cual se asegura una plantilla de medición robusta.
- 2 - Luego, los operadores son guiados con instrucciones en pantalla y visualizaciones 3D a lo largo de la adquisición de las mediciones.
- 3 - Una vez que concluya el proceso de adquisición de mediciones, los resultados de inspección se publican automáticamente en hojas de cálculo de Excel preformateadas que se vinculan dinámicamente a los datos de inspección 3D del proyecto de inspección.
- 4 - Las hojas de cálculo preformateadas le proporcionan al metrólogo una variación del equipo calculada automáticamente y lista para el análisis, es decir, repetibilidad, índices de rendimiento y gráficos.
- 5 - Para completar este análisis y optimizar rápidamente el proceso de medición, el metrólogo puede ajustar los parámetros de medición en el proyecto de inspección y ver su influencia directa en la variación del equipo, y PolyWorks actualizará automáticamente los valores del gráfico y el índice de la hoja de cálculo.

## Estudios de R&R de galgas

Si bien los estudios de repetibilidad le permiten analizar y optimizar la variación del equipo del sistema de medición, se requieren estudios de repetibilidad y reproducibilidad de galga, o estudios de R&R de galga, para completar la validación final de un sistema de medición.

Los estudios de R&R de galga generalmente se ejecutan después de los estudios de repetibilidad porque requieren más recursos, piezas y costes. Además, al realizar primero un estudio de repetibilidad, el metrólogo puede corregir la variación del equipo antes de analizar y corregir su reproducibilidad. Existen varios métodos empíricos aceptados para calcular la incertidumbre de la repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición. Los dos métodos más comunes son el Método de promedio y rango (X-bar R) y el método de Análisis de varianza (ANOVA). En ambos casos, la recopilación de datos sigue reglas estrictas para garantizar resultados creíbles:

- **Número de operadores:** se requiere un mínimo de 3 operadores y deben utilizar el sistema de medición en un contexto de producción.
- **Número de piezas:** Se debe seleccionar un mínimo de 2 piezas, representativas de las variaciones que se encuentran en el proceso de fabricación. Si es posible, el número preferido sería 10; si el número de piezas es mayor, el cálculo del comportamiento del proceso será mejor.
- **Número de repeticiones:** Cada operador debe medir todas las piezas más de una vez. Normalmente se realizan 2 o 3 repeticiones.
- **Orden aleatorio de las mediciones:** Para garantizar que el orden de medición no influya en los resultados, cada operador debe medir las piezas en un orden aleatorio.

**Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente**

**Entendiendo los conceptos básicos del MSA**

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

**Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos**

**Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente**

Estudios de repetibilidad

Estudios de R&R de galgas

**Recomendaciones para metrólogos**

**Conclusión**

La solución de MSA de PolyWorks permite a los usuarios crear y ejecutar un estudio de R&R de galga usando estos dos métodos estándar:

- 1 - El metrólogo selecciona rápidamente el método de análisis y especifica parámetros como el número de operadores, las repeticiones y las piezas.
- 2 - Posteriormente, PolyWorks crea el proyecto de inspección con todas las piezas necesarias en un orden de ejecución específico.
- 3 - Después, una hoja de orden de ejecución se exporta automáticamente a una hoja de cálculo de Excel, que guía a los operadores durante el proceso de recopilación de mediciones, lo que garantiza un orden de mediciones aleatorio.
- 4 - Una barra de herramientas guía a los operadores por el proceso de inspección, asegurando que se midan todas las características clave y que se adquieran suficientes datos palpados y escaneados para obtener extracciones de mediciones confiables.
- 5 - Al finalizar la medición, el metrólogo utiliza el proyecto de inspección para calcular la variabilidad del sistema de medición.

La principal diferencia entre las metodologías X-bar R y ANOVA radica en el análisis de los resultados. El método X-bar R hace posible cuantificar la repetibilidad y reproducibilidad utilizando cálculos del gráfico de control. La guía "Análisis del sistema de medición" de AIAG presenta la metodología en detalle. La R&R de galga con la metodología ANOVA brinda más información y por lo tanto es más completa.

El análisis de varianza (ANOVA) es un análisis estadístico que desglosa las fuentes de variación en un sistema de medición de la siguiente manera:

- **Repetibilidad:** La variación del sistema de medición que no es atribuible a otras fuentes de variación.
- **Operador:** Variación entre operadores.
- **Interacción pieza/operador:** Variación resultante de la interacción entre los operadores y las piezas (cuando un operador mide diferentes piezas de manera diferente).
- **De pieza a pieza:** Variación que viene de las piezas dentro del estudio. Representa la variación en el proceso de fabricación.

Sin importar el método que se utilice, las fuentes de la variación se consideran estadísticamente independientes. Por lo tanto, se ensamblan de forma aleatoria (suma de varianzas) para expresar la incertidumbre total.

Primero, la metodología determina si la variación resultante de la interacción entre las piezas y los operadores es significativa. Si lo es, se debe considerar en la reproducibilidad del sistema ( $\sigma_{reproducibilidad}$ ) de la siguiente manera:

$$\sigma_{reproducibilidad}^2 = \sigma_{operador}^2 + \sigma_{interacción}^2$$

Una vez que se ha identificado directamente la repetibilidad ( $\sigma_{repetibilidad}$ ) durante el estudio, es posible determinar la repetibilidad y reproducibilidad ( $\sigma_{R\&R}$ ) del sistema de medición de la siguiente manera:

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{reproducibilidad}^2 + \sigma_{repetibilidad}^2$$

**Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente**

**Entendiendo los conceptos básicos del MSA**

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

**Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos**

**Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente**

Estudios de repetibilidad

Estudios de R&R de galgas

**Recomendaciones para metrólogos**

**Conclusión**

Finalmente, la variación total del proceso medido ( $\sigma_{total}$ ) se obtiene sumando la repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición a la variación calculada del proceso de fabricación ( $\sigma_{part\ to\ part}$ ) de la siguiente manera:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{R\&R}^2 + \sigma_{de\ pieza\ a\ pieza}^2$$

El análisis de los resultados del estudio consiste en:

- Garantizar que la incertidumbre del sistema de medición ( $\sigma_{R\&R}$ ) tenga una contribución pequeña a la variación total del proceso de medición. La variación estimada del proceso de fabricación (de pieza a pieza) debe dar cuenta de la mayor parte de la variabilidad. Cuando la contribución de la variación de pieza a pieza es relativamente más alta que el resto de la incertidumbre, significa que el sistema de medición puede distinguir de manera fiable los errores de fabricación.

- Comparar la variación del sistema de medición con los límites de especificación (tolerancias) para garantizar que la variación represente un máximo del 30% de los límites.

El paso de publicación de la solución MSA de PolyWorks convierte los datos del estudio de MSA en resultados interpretables y datos procesables mediante tablas, resúmenes y gráficos fáciles de leer, como se muestra en la Figura 8. Esta es una parte potente e importante del proceso de estudio digital, ya que facilita en gran medida la interpretación y resolución de problemas de los resultados del estudio. Les permite a los usuarios: publicar los resultados en la plantilla de Excel de X-bar R o ANOVA seleccionada y analizar rápidamente el error de medición y otras fuentes de variabilidad. Al realizar un estudio ANOVA, por ejemplo, el metrólogo puede desglosar la varianza en cuatro categorías: piezas, evaluadores, interacción entre piezas y evaluadores y error de replicación debido a la galga.

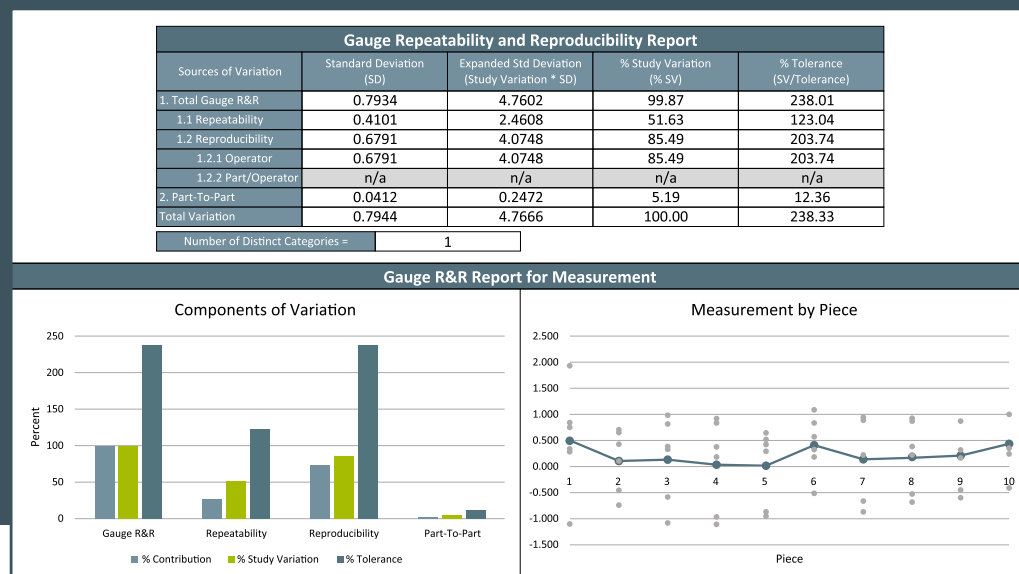


Figura 7  
R&R  
de galga

Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente

Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

Estudios de repetibilidad

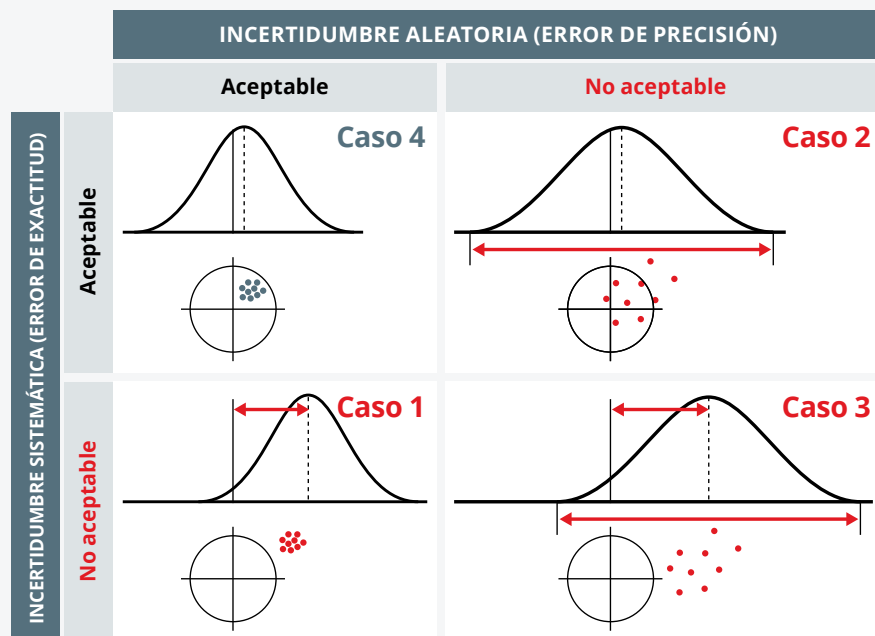
Estudios de R&R de galgas

Recomendaciones para metrólogos

Conclusión

# Recomendaciones para metrologos

Los datos recopilados sobre los resultados de medición del sistema brindan información sobre el efecto de las incertidumbres de medición. Usando los índices de rendimiento (página 5), el metrologo puede realizar correcciones para optimizar su proceso de medición. Usemos un ejemplo concreto: un diagrama de dispersión y objetivo de valores de error, como se ilustra en la Figura 8.



**Figure 8** Errores de precisión y exactitud

El primer problema (caso 1) que un metrologo puede identificar es si hay un error de exactitud; puede provenir del sesgo en la linealidad del sistema, pero en ambos casos, este error puede corregirse fácilmente. Las posibles causas del error de exactitud pueden ser<sup>4</sup>:

- El dispositivo de metrología necesita calibración
- Un dispositivo, equipo o accesorio está desgastado
- Un error en la referencia utilizada en el proceso de análisis
- El método de medición (por ejemplo, la técnica de sujeción)

El segundo problema al que se puede enfrentar un metrologo es cuando hay un error de precisión (caso 2). Esto puede estar relacionado con el propio sistema de medición (repetibilidad) o puede ser causado por los operadores (reproducibilidad).

Las posibles causas de error de precisión pueden<sup>4</sup>:

- Relacionados con la pieza: forma, posición, acabado de la superficie, ahusamiento, consistencia de la muestra
- Relacionados con el instrumento: reparación, desgaste, fallo del equipo o accesorio, mala calidad o mantenimiento
- Relacionados con la metodología: variación en la configuración, técnica, agarre, sujeción
- Relacionados con el operador: técnica, posición, falta de experiencia, habilidad de manipulación o capacitación, sensación de fatiga

Si todas las fuentes de error están presentes (caso 3), el metrologo debe desglosar el rendimiento del sistema de medición utilizando los índices y corregir un tipo de error a la vez para que el sistema de medición sea aceptable (caso 4).

<sup>4</sup> Análisis del sistema de medición (MSA) publicado por el Grupo de acción de la industria automotriz (AIAG)

Recopilar mediciones 3D fiables | El enfoque en la metrología 3D inteligente

Entendiendo los conceptos básicos del MSA

Definición del sistema de medición

Índices de rendimiento del sistema de medición

- Incertidumbre sistemática
- Incertidumbre aleatoria

Capacidad y rendimiento del sistema de medición

Incertidumbre expandida

Cómo elegir la metodología adecuada para evaluar la incertidumbre de los sistemas de medición 3D complejos

Realización de estudios de MSA utilizando la metodología experimental y software de metrología 3D inteligente

Estudios de repetibilidad

Estudios de R&R de galgas

Recomendaciones para metrologos

Conclusión

# Conclusión

Un proceso efectivo de análisis del sistema de medición garantiza que esté recopilando mediciones 3D fiables. Hoy en día, no hay necesidad de sufrir con procesos complejos y obsoletos que requieren múltiples soluciones de software de terceros y experiencia avanzada en aplicaciones de software de estadística.

La solución de software de metrología 3D inteligente de MSA de PolyWorks® facilita enormemente la configuración y la ejecución de estudios de MSA para entornos con dispositivos de medición 3D, proporcionando un análisis fiable de las variaciones del sistema de medición. Proporciona un flujo de trabajo completamente digital y fácil de usar que garantiza la integridad de los datos de medición y permite a los fabricantes realizar con confianza estudios de MSA para cada pieza nueva, lo que brinda un mejor control de calidad.

Laurent Émond-Girard, P.Eng., M.A.Sc.  
Ingeniero de procesos de fabricación, InnovMetric

**innovmetric**

Para obtener más información

Comuníquese con nosotros: [1-418-688-2061](tel:1-418-688-2061) | [info@innovmetric.com](mailto:info@innovmetric.com)

Visite nuestro sitio web: [www.innovmetric.com](http://www.innovmetric.com)



|                |        |             |          |                   |           |
|----------------|--------|-------------|----------|-------------------|-----------|
| Mounting Rail  | Carole | NUMBER:     | Sample 1 | GAUGE NUMBER:     | AOI-B5293 |
| Datum Circle A | 220    | OPERATOR B: | Tranqui  | OPERATOR C:       | William   |
|                |        | CONTROL:    | Ultimate | CHARACTERISTIC X: | 1         |
|                |        | TOLERANCE:  | 10       | UNITS:            | mm        |

| Measurement Data |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Trials           | Pieces  |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                  | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.800 | 223.600 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.300 | 222.700 | 223.600 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.267 | 222.800 | 223.633 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.400 | 223.500 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.500 | 223.500 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.467 | 223.500 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.000   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.300 | 220.700 | 223.700 | 221.100 | 222.700 | 223.300 | 220.400 |
| Average          | 224.533 | 223.500 | 220.367 | 220.800 | 223.567 | 221.167 | 222.833 | 223.367 | 220.400 |
| Range            | 0.200   | 0.000   | 0.100   | 0.100   | 0.200   | 0.100   | 0.200   | 0.200   | 0.000   |
| 1                | 224.400 | 223.500 | 220.400 | 220.900 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.500 | 220.400 |
| 2                | 224.600 | 223.500 | 220.400 | 220.800 | 223.500 | 221.200 | 222.900 | 223.300 | 220.400 |
| 3                | 224.600 | 223.500 | 220.    |         |         |         |         |         |         |