

# **CAPÍTULO V**

## **DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN**

## CAPÍTULO V

### DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN

La evaluación y definición de los sistemas de medición consiste en determinar la capacidad y estabilidad de los sistemas de medición por medio de estudios de estabilidad, repetibilidad, reproducibilidad, linealidad y exactitud.

Un **sistema de medición** es la colección de operaciones, procedimientos, instrumentos de medición y otro equipo, software y personal definido para signar un número a la característica que está siendo medida.

#### Importancia de las mediciones

Las mediciones son muy importantes en toda empresa, pues con base en ellas se evalúa el desempeño de las mismas, de sus equipos, de su gente, y se toman decisiones importantes a veces costosas. Toda medida está sujeta a error.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana, la **calibración** de un instrumento de medición se define como el conjunto de operaciones que establecen bajo condiciones especificadas, la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición, o los valores representados por una medida materializada o un material de referencia, y los valores correspondientes de una cantidad obtenida por un patrón de referencia.

La misma norma define **ajuste** como la operación destinada a llevar un instrumento de medición a un estado de funcionamiento y exactitud adecuados para su uso.

Es decir, de acuerdo con lo anterior, calibrar solamente significa comparar y no ajustar o arreglar el instrumento como pudiera creerse comúnmente. La calidad de un sistema de medición se caracteriza por sus propiedades estadísticas: insesgado y varianza cero (idealmente). La evaluación de un sistema de medición significa examinar su variación y los factores que la afectan.

#### Precisión y Exactitud

La siguiente figura muestra cuatro casos de disparos a un blanco fijo. Se detalla también la evaluación de los disparos desde el punto de vista de su precisión y exactitud. **Precisión** se refiere a la variación o dispersión de los disparos. Poca variación significa un buen grado de precisión. **Exactitud** se define con respecto a su cercanía (sesgo) con el centro del blanco. Mayor cercanía implica un buen grado de exactitud.

Preciso, no exacto

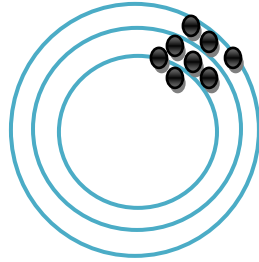


Figura 5.1 Disparos precisos, no exactos

Exacto, no preciso

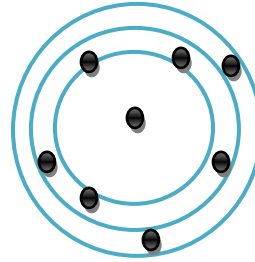


Figura 5.2 Disparos exactos, no precisos

Ni exacto ni preciso

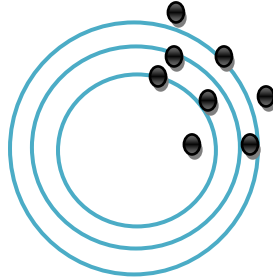


Figura 5.3 Disparos ni exactos, ni precisos

Preciso y exacto

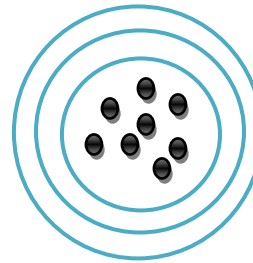


Figura 5.4 Disparos precisos y exactos

La figura 5.1 muestra que los disparos fueron muy precisos respecto a un mismo punto, mientras que no fueron exactos en el centro del blanco.

La figura 5.2 muestra que los disparos tuvieron un mayor grado de exactitud con respecto al blanco pero nada precisos con respecto a un mismo punto.

La figura 5.3 muestra disparos que no coinciden en ningún punto y están totalmente alejados del objetivo.

La figura 5.4 muestra disparos concentrados en el blanco, lo cual los hace precisos y exactos.

### Propiedades estadísticas de los sistemas de edición

Todos los sistemas de medición deben poseer las siguientes propiedades estadísticas:

- Estar en control estadístico (estabilidad estadística).
- Su variabilidad debe ser pequeña comparada con las especificaciones y con la variación del proceso.
- Los incrementos de medida no deben ser mayores a 1/10 de lo menor entre las especificaciones y con la variación del proceso (discriminación o resolución).
- Poco sesgo.

La evaluación de los sistemas de medición se efectúa a través de estudios de repetibilidad, reproducibilidad (Gage R&R), exactitud, estabilidad y linealidad.

Los usos de la evaluación son:

1. Aceptar equipo nuevo.
2. Comparar dos equipos entre sí.
3. Evaluar un calibrador sospechoso.
4. Evaluar un calibrador antes y después de repararlo.

5. Antes de implantar gráficos de control.
6. Cuando disminuya la variación del proceso.
7. De manera continua de acuerdo con la frecuencia de medición recomendada en los estudios.

### 5.1. Exactitud

La exactitud se puede definir como la diferencia entre el promedio de las mediciones hechas por un operario (VP) y el valor real (VR) obtenido con el **máster** (patrón o instrumento de medición usado para medir a los de uso diario). El porcentaje de error se define mediante:

$$\%ERROR = \frac{|VP - VR|}{\gamma} (100)$$

$$\gamma = \frac{\bar{R}}{d_2} \text{ (variación del proceso), o LSE - LIE (tolerancia)}$$

Se espera que este valor sea no mayor de 10%. Los problemas de falta de exactitud pueden deberse a calibración inadecuada, error en el máster, **gauge** (o gauge es el instrumento de medición) desgastado, el calibrador no está hecho para medir esa característica, se está midiendo la característica equivocada, se usa de manera incorrecta.

La figura 5.5 muestra la definición gráfica de exactitud.

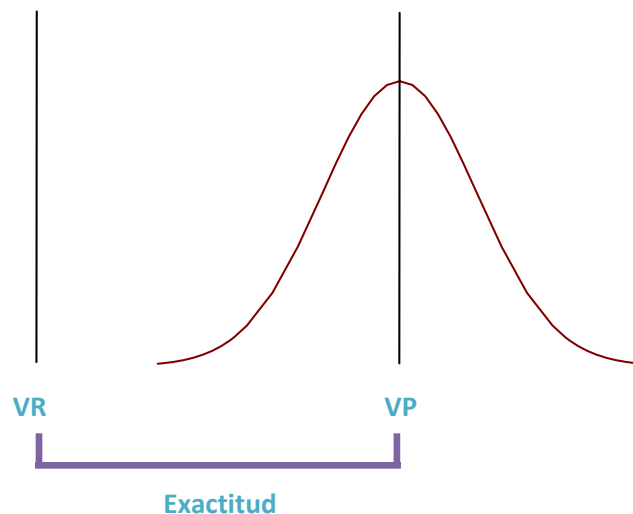


Figura 5.5 Definición gráfica de exactitud

### 5.2. Linealidad

Linealidad se define como la diferencia en exactitud (sesgo) entre el master y el promedio observado sobre todo el rango de operación del instrumento (gauge). Los problemas de falta de linealidad pueden deberse a que el instrumento no está calibrado de manera correcta en los extremos de su rango de operación, existe error en las mediciones máximas y mínimas del master,

el calibrador (instrumento de medición) está desgastado, y /o a que puede ser requerida una revisión del diseño de partes internas del calibrador.

El procedimiento para obtener la linealidad consiste en:

1. Tomar varias piezas que cubran el rango de operación del calibrador y medirlas con el master.
2. Medir cada pieza varias veces por un sólo operador.
3. Obtener el promedio de las mediciones y restarlo del valor del master de cada pieza (exactitud promedio).
4. Ajustar una línea de regresión  $y = ax + b$ , donde:
  - a = pendiente,
  - b = intersección con el eje y,
  - x = medición del master,
  - y = exactitud (sesgo) promedio.
  - n = número de mediciones.

Se deben usar las siguientes fórmulas para definir las variables:

$$a = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

$$R^2 = \frac{(n \sum xy - \sum x \sum y)^2}{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)(n \sum y^2 - (\sum y)^2)}$$

La linealidad se calcula como:  $|a|$  (variación del proceso o tolerancia).

El porcentaje de linealidad es  $100$  (linealidad / variación del proceso o tolerancia).

Se desea un porcentaje de linealidad menor o igual a  $10$  por ciento.

Existen dos fases en la evaluación de los sistemas de medición:

1. Verificar si los sistemas de medición tienen las propiedades estadísticas necesarias para desarrollar su función.
2. Evaluar periódicamente los sistemas de medición con respecto a sus propiedades estadísticas. Esto es necesario aunque se lleven a cabo calibraciones o mantenimientos periódicos de los instrumentos, para determinar si ha habido o no una degradación de los mismos con respecto al tiempo.

La figura 5.6 muestra la definición gráfica de linealidad.

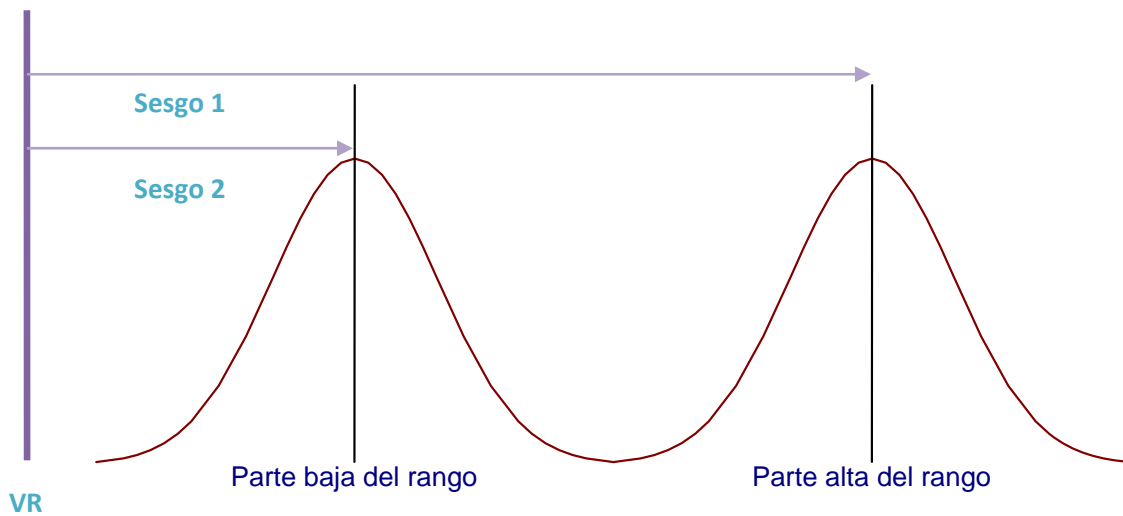


Figura 5.6 Definición gráfica de linealidad

### 5.3. Estabilidad

La estabilidad es la cantidad de variación en exactitud sobre cierto periodo. Sin evaluar la estabilidad no es posible asegurar evaluaciones confiables sobre las demás propiedades estadísticas. La figura 5.7 muestra la definición gráfica de estabilidad.

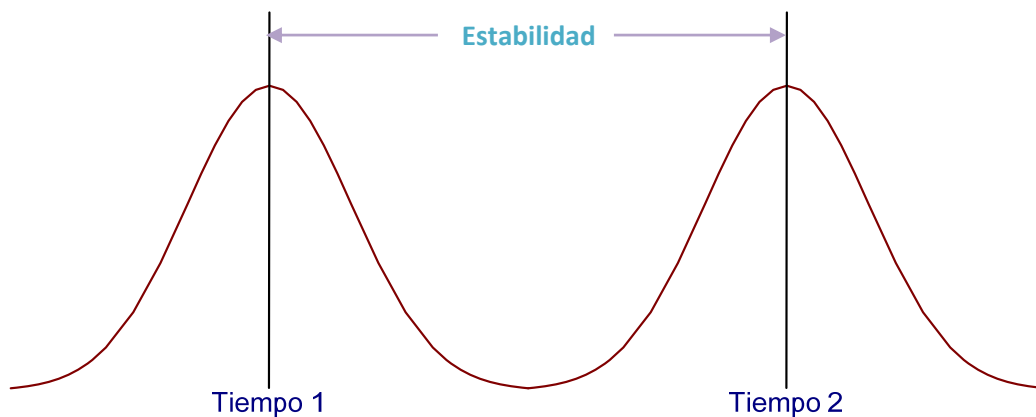


Figura 5.7 Definición gráfica de estabilidad

La manera de determinar la estabilidad es a través de un gráfico de control, generalmente medias y rangos.

Interpretación:

1. Si existe una situación fuera de control en los rangos, significa que la repetibilidad no es estable.

2. Si existe una situación fuera de control en las medias, significa que la exactitud ha cambiado. Es necesario encontrar las causas y corregir la situación. Si es debido a desgaste, hay que recalibrar el instrumento.

#### 5.4. Repetibilidad

La repetibilidad o precisión es la variación en las mediciones hechas por un sólo operador en la misma pieza y con el mismo instrumento de medición. Se define como la variación alrededor de la media. Esta variación debe ser pequeña con respecto a las especificaciones y a la variación del proceso. La definición gráfica de repetibilidad se muestra en la figura 5.8.

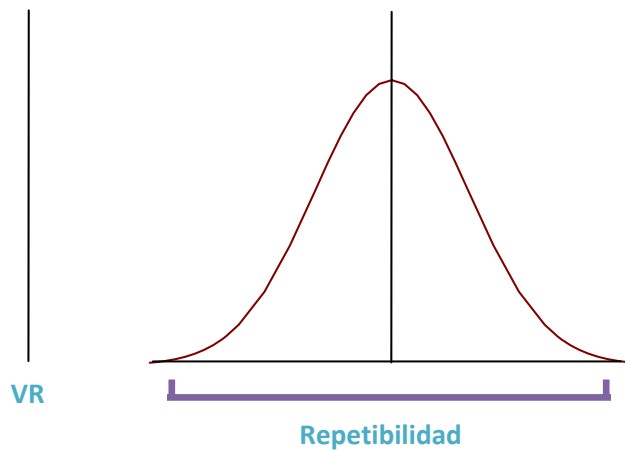


Figura 5.8 Definición gráfica de repetibilidad

La repetibilidad se puede presentar gracias a la presencia de suciedad, fricción, desajuste o desgaste.

#### 5.5. Reproducibilidad

La reproducibilidad se define como la variación entre las medias de las mediciones hechas por varios operarios con las mismas piezas y con el mismo instrumento de medición. La definición gráfica se muestra en la figura 5.9.

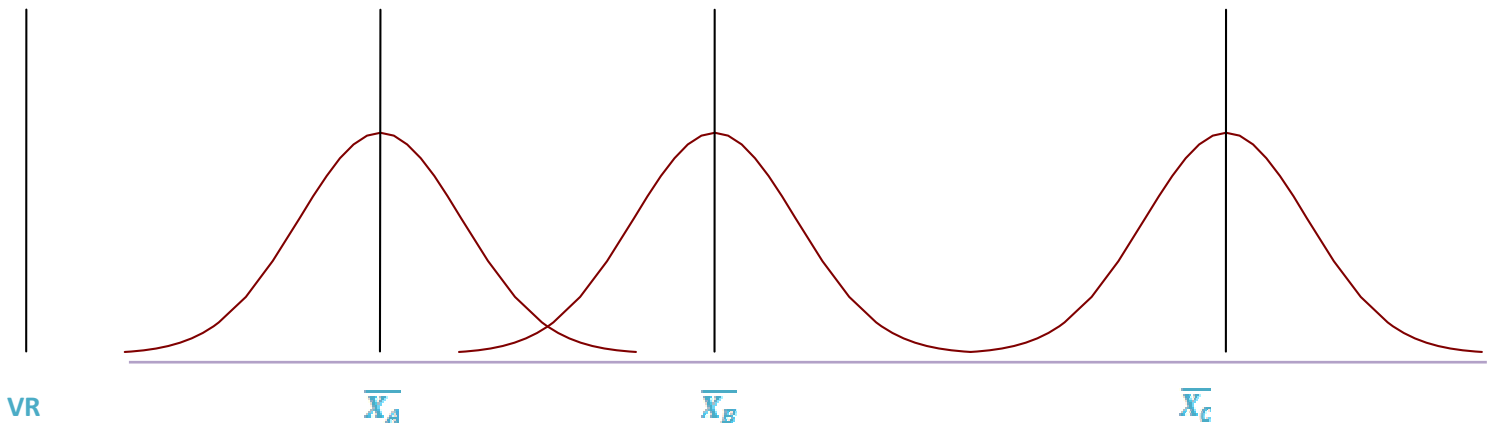


Figura 5.9 Definición gráfica de reproducibilidad

### Evaluación de la repetibilidad y la reproducibilidad (GR&R)

La calidad de un sistema de medición normalmente está determinada por las propiedades estadísticas de los datos que se generan. Aunque cada sistema de medición puede tener diferentes propiedades, hay algunas que todos los sistemas deben de incluir:

- Estar bajo control estadístico, es decir, que la variación es debida a causas comunes solamente y no a causas especiales. A lo anterior se le denomina estabilidad estadística.
- La variabilidad del sistema de medición debe ser pequeña comparada con la variabilidad del proceso de manufactura.
- La variabilidad debe ser pequeña comparada con los límites de la especificación.
- Los incrementos en las mediciones deben de ser más pequeños que la variabilidad del proceso o los límites de especificación. Una regla común dice, que los incrementos no deben ser mayores a un décimo del valor más pequeño de la variabilidad del proceso o los límites de especificación.

Los procedimientos deberán asegurar que los sistemas de medición evalúen las siguientes propiedades estadísticas: repetibilidad, reproducibilidad, exactitud, estabilidad y linealidad.

Colectivamente, estos procedimientos son a veces llamados “estudio de instrumentos R&R” porque evalúan las propiedades estadísticas reproducibilidad y repetibilidad. En general, son fáciles de usar en un ambiente manufacturero y aunque tienen fundamento estadístico, su uso y entendimiento por cualquier tipo de empleado es sencillo.

Estos estudios toman en cuenta la variación del operador o quien usa el instrumento, la variación del instrumento o equipo de medición, la variación conjunta de los dos, la variación de la característica a medir y la variación total.

Normalmente el valor de R&R no deberá rebasar de un 30% con respecto a la variación total o la tolerancia para considerar que se tiene un sistema de medición confiable.

Al método de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) se le conoce como medios y rangos o método largo. Es la combinación de los estudios de repetibilidad y reproducibilidad.

Los pasos para el estudio son:

1. Calibrar el instrumento.
2. Seleccionar 2 o 3 operarios que midan por lo menos dos veces las mismas 10 piezas (numeradas) en orden aleatorio.
3. Seleccionar las piezas que cubran todo el rango de variación de la especificación, incluyendo algunos fuera de ella.
4. Llenar el formato de R&R o usar algún software.

Se concluye que:

- Si la repetibilidad es grande comparada con la reproducibilidad, las razones posibles son:
  - El calibrador necesita mantenimiento.
  - El calibrador debería ser rediseñado para ser más rígido.
  - Mejora la sujeción o la localización de la pieza.



- Existe mucha variación entre las piezas.
- Si la reproducibilidad es mayor comparada con la repetibilidad, las causas posibles son:
  - El operario necesita entrenamiento en el uso del calibrador.
  - Las calibraciones en la escala del instrumento no están claras.
  - Tal vez sea necesario usar algún dispositivo de fijación de calibrador para que el operario lo pueda usar con facilidad.

### 5.6. Método del rango

El método del rango es un método corto que se usa como una aproximación en la evaluación de la repetibilidad y reproducibilidad de un sistema de medición. Se recomienda usar cinco piezas y dos operadores.

Las siguientes fórmulas se utilizan para obtener los valores de este método:

$$GR\&R = \frac{5.15 \bar{R}}{d^*_2}$$

Donde:

$d^*_2 = 1.19$  para estudios con 2 operadores y cinco piezas.

$$\%GR\&R = \frac{100 GR\&R}{Var Pro}$$

$$Var Pro = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

$d_2$  de un gráfico de control, tomando en cuenta que  $d^*_2 \neq d_2$

Si no se tiene la variación del proceso (Var Pro), se puede usar la tolerancia. En este caso, %GR&R tiene un valor inaceptable.

### 5.7. Método del Anova

Otro método alternativo al estudio largo de R&R es el Análisis de Varianza (ANOVA). El análisis de varianza sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otros o más conjuntos de datos.

Las ventajas del ANOVA con respecto al método tradicional son las siguientes:

- Las varianzas pueden ser estimadas con mayor exactitud.
- Se puede obtener mayor información (como la interacción entre las piezas y los operarios).

Se considera un modelo de efectos aleatorios para los factores operadores, piezas (partes), operadores-por-pieza y réplicas.

Los componentes de variación considerados son:

$$\sigma^2_{Gage (RR)} = \sigma^2_{Reproducibilidad} + \sigma^2_{Repetibilidad}$$

$$\sigma^2_{Reproducibilidad} = \sigma^2_{op} + \sigma^2_{p.op}$$

$$\sigma^2_{Repetibilidad} = \sigma^2$$

Variación total = var.piezas + var. op. + var. pzas-por-op. + var. repetibilidad (error)

### 5.8. Estabilidad y capacidad

La estabilidad y la capacidad, que son las características requeridas por un sistema de medición, se componen a su vez de otros elementos.

La estabilidad incluye la reproducibilidad, es decir, que las mediciones no deben cambiar por el efecto del tiempo o por cambios en operadores o en el medio.

La capacidad, en cambio, necesita de sensibilidad, es decir, de repetibilidad (precisión) y exactitud (sesgo).

Se recomienda que la capacidad del sistema de medición tenga un Cp mayor a 4, es decir, que la variación de las medidas sea menor a la mitad de la variación del proceso.

Cuando un proceso de fabricación es estable, se pueden usar con toda confianza durante el periodo de vigilancia los límites de control obtenidos a partir de las observaciones del periodo base. Si cualquiera de los valores de la media y el rango durante el periodo base estuvieran fuera de los límites de control, ello indicaría una probable falta de estabilidad del proceso.

La capacidad del proceso se puede establecer al iniciarse el proyecto, mediante un estudio preliminar o piloto, o vigilar de forma continua durante la producción (ejecución). La capacidad del proceso se puede definir como el intervalo de la variación que incluirá casi todos los productos que se obtengan mediante el proceso.

Al realizar el estudio preliminar, es importante minimizar los efectos de los factores esencialmente ajenos al estudio. Tales factores son variaciones no naturales de material, ajustes del proceso y deterioro del mismo. De aquí que deban utilizarse materiales homogéneos, no realizar ajustes durante el estudio y, si se produce el deterioro del proceso durante esta fase, calcular su efecto y restarlo.

Una vez observadas y explicadas esas condiciones, se puede realizar un estudio de capacidad reuniendo los datos necesarios (al menos 50 observaciones; mejor si son 100 o más) y calculando la desviación estándar de dichos datos definida en la expresión:

$$\text{Capacidad del proceso} = 6\sigma$$

La mejor calidad obtenible o la menor fracción defectuosa, se puede denominar capacidad del proceso, siempre que sean alcanzables por simple modificación del mismo.