

- Cuantificar los costos asociados a errores de clasificación, tanto de rechazar piezas buenas como de aceptar piezas malas.
- Disponer de conocimientos suficientes para determinar la adecuabilidad de los medios de medición.

4. CONCLUSIONES

Del presente trabajo podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Es posible seleccionar en forma objetiva el medio de medición mas adecuado, para un uso en particular, en función de las características del proceso de fabricación, de las especificaciones de proyecto y de las características metrológicas del SM utilizado.
- Esta metodología puede ser aplicable en una serie de situaciones, inclusive donde la fabricación o la inspección tengan distribuciones estadísticas diferentes a la normal.
- Queda demostrado que, en el caso de procesos capaces (con un índice de capacidad alto), la selección del SM no es tan critica como en el caso de procesos incapaces.
- En la medida que la caracterización del proceso sea evaluada con el mismo SM que se usa para la inspección, la capacidad real del proceso se encuentra “contaminada” por dicho sistema. Es decir, la capacidad aparente (conocida) del proceso será mayor que la capacidad verdadera. De esta forma seria posible mejorar en parte la capacidad del proceso, en la medida que se disponga de un mejor SM.
- La metodología propuesta se adapta mejor a procesos de fabricación y medición que sean estables en el tiempo y que no presenten tendencias ni errores sistemáticos no corregidos,
- El tomar una correcta decisión con respecto a que SM utilizar, no siempre significa usar un SM mejor o más costoso, en algunos casos la mejor decisión significa utilizar un SM de nivel metrológico inferior ya que la clasificación no es afectada por dicho sistema.

Quisiera por último agradecer a la Fundación CERTI a LABMETRO y a DICTUC S.A. por su apoyo en la realización de este Maestrado, uno de cuyos resultados es este trabajo.

5. REFERENCIAS

- Chrysler, Ford y General Motors, 1997, “Análise dos Sistemas de Medição”, MSA, versión en portugués, 127p.
- INN, 1998, Norma NCh2450 “Vocabulario de Términos Fundamentales y Generales de Metrología”. Homologación del documento ISO, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, 41p.
- ISO, 1997, Norma ISO/FDIS 14253-1 “Geometrical Products Specifications (GPS) – Inspection by Measurements of Workpieces and Measuring Equipment – Part 1”, 14p.
- Johnson, Richard A., 1994, “Miller and Freund’s Probability and Statistics for Engineers”, 5ª edición, Universidad de Wisconsin-Madison, pp. 138-141, 168-173
- Schoeler, N. y Donoso, J., 1999, “Gerenciamento de Instrumentos de Medição Segundo a ISO 9000 e QS 9000” Manual del curso CM-113 impartido por la Fundación CERTI pp. 95-129.

De esta forma, por ejemplo, PDRP considera la probabilidad de que una pieza sea erróneamente clasificada como pequeña, ver ecuación (5). Es decir, la probabilidad de que el resultado de la medición se encuentre entre LI y LIA (pieza tiene una dimensión menor a la mínima requerida para ser aceptada), siendo que en realidad, la pieza se encuentra dentro de tolerancia (considerando un sistema de medición ideal), es decir entre el LIE y el LSE.

El cumplimiento de ambas condiciones se traduce en que:

- La variable “x” que representa al sistema de medición, se encuentra centrada en $X_{pa} + y$, con una desviación estándar de σ_{sm} y se obtenga un resultado de medición entre LI y LIA es decir en la zona donde que corresponde a una pieza pequeña.
- Al mismo tiempo, la variable “y” que representa al proceso de fabricación respectivo, se encuentra centrada en X_{pv} , con una desviación estándar de σ_{pv} y evaluada entre LIE y LSE. Es decir en la zona de especificación de tolerancia.

Para llegar a un valor numérico, es necesario utilizar un software que permita resolver esta integral doble, como se expresa en la ecuación (5) para el caso de PDRP

$$PDRP = \int_{LIE-X_{pv}}^{LSE-X_{pv}} \int_{LI}^{LIA} \frac{e^{\frac{-(y)^2}{2 \cdot (\sigma_{pv})^2}} \cdot e^{\frac{-[x-(X_{pa}+y)]^2}{2 \cdot (\sigma_{sm})^2}}}{(2 \cdot \pi \cdot \sigma_{pv} \cdot \sigma_{sm})} dx dy \quad (5)$$

3.4 Consideraciones económicas

La metodología propuesta es aplicable, en la medida que pueda asociarse un costo directo o indirecto tanto al hecho de rechazar piezas buenas como de aceptar piezas que no cumplen con las tolerancias exigidas. Con respecto a estas últimas, además se pueda plantear una diferenciación entre aquellas piezas que erróneamente se les considera muy grandes de aquellas que se les considera muy pequeñas. Por ejemplo, aquellas grandes podrían eventualmente ser reprocesadas en cambio que las pequeñas serían desechadas. Por otra parte, es necesario definir un lote de piezas sobre el cual calcular los costos.

Existe una serie de otros costos asociados que no han sido tratados en este artículo, pero que por supuesto, deben ser tomados en cuenta a la hora de definir el sistema de medición mas adecuado. Entre estos costos podemos mencionar; compra y mantención de instrumentos, adecuación de condiciones ambientales, entrenamiento de personal, calibración periódica de instrumentos.

3.5. Estudio de caso

Actualmente esta metodología se encuentra en fase de validación, para ello se han tomado algunos ejemplos reales de empresas, para evaluar su desempeño. Hasta el momento, las conclusiones más destacadas son, la importancia de:

- Disponer de procesos capaces para evitar problemas de clasificación.
- Disponer de SM adecuados, que no afecten negativamente la capacidad del proceso de fabricación respectivo.

3.3 Formulación matemática

Para la determinación de las 4 probabilidades de interés, fue utilizada la definición de la función de distribución de probabilidades normal (μ, σ^2):

$$f_{dp}(x) = \frac{e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (3)$$

La ecuación (3) será utilizada tanto para la distribución del proceso de fabricación verdadero (X_{pv}, σ_{pv}^2), como para la distribución del sistema de medición (X_{pa}, σ_{sm}^2). Siendo X_{pv} , la media del proceso verdadero (eliminando los efectos sistemáticos del SM) e X_{pa} a media aparente obtenida usando el SM. De esta forma, se consigue que la media del SM sea cero. La probabilidad de clasificación queda determinada como:

$$\text{Probabilidad} = \int_{A-X_{pv}}^{B-X_{pv}} \int_C^D \frac{e^{-\frac{(y)^2}{2 \cdot (\sigma_{pv})^2}} \cdot e^{-\frac{[x-(X_{pa}+y)]^2}{2 \cdot (\sigma_{sm})^2}}}{(2 \cdot \pi \cdot \sigma_{pv} \cdot \sigma_{sm})} dx dy \quad (4)$$

Donde la variable “x” representa al sistema de medición y la variable “y” representa al proceso de fabricación.

Los límites para las 4 probabilidades de interés, se muestran en la Tabla 1, donde:

- LIE: Límite inferior de especificación, dado por a tolerancia de proyecto,
- LSE: Límite superior de especificación de proyecto,
- LIA: Límite inferior de aceptación,
- LSA: Límite superior de aceptación,
- LI: Límite inferior de integración, que teóricamente debiese ser cero, sin embargo, para agilizar el proceso de cálculo, se ha limitado a ser un número menor que LIE o LIA de tal forma que en la integración, no queden eventos sin considerar.
- LS: Límite superior de integración, en forma análoga al caso de LI, debiese tomar un valor infinito, sin embargo ha sido limitado a ser un número mayor que LSE o LSA de tal forma que en la integración, no queden eventos sin considerar. La selección de LI e LS, permite optimizar el tiempo requerido para el cálculo, asegurando un resultado sin errores significativos.

Tabla 1. Límites de integración

Evento	Proceso de fabricación		Sistema de medición	
	A	B	C	D
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
PDRP	LIE	LSE	LI	LIA
PDRG	LIE	LSE	LSA	LS
PFAP	LI	LIE	LIA	LSA
PFAG	LSE	LS	LIA	LSA

El segundo grupo esta compuesta por aquellos eventos que son causados por errores de clasificación, es decir aceptación de piezas que no cumplen con las tolerancias y rechazo de piezas que si cumplían con las especificaciones. En este estudio serán considerados estos 4 eventos.

Por último, el tercer grupo esta formado por aquellos eventos que producen un rechazo cruzado de las piezas, es decir, rechazar una pieza pequeña por ser considerada grande o rechazar una pieza grande por ser considerada pequeña. Este tipo de errores se considera como un error grosero e inaceptable a nivel industrial, de tal forma que, una solución que produzca errores de este tipo, no sería considerada como viable.

De esta forma, la probabilidad de aceptar erróneamente una pieza que no cumpla con las especificaciones de tolerancia esta dado por PFAP + PFAG. Por su parte la probabilidad de rechazar erróneamente una pieza por ser considerada pequeña esta dada por PDRP. Por último, la probabilidad de rechazar erróneamente una pieza por ser considerada grande esta dada por PDRG.

3.2 Consideraciones metrológicas

Para una correcta aplicación de la metodología propuesta, se deben respetar y cumplir las siguientes condiciones:

- La incertidumbre del SM debe considerar las condiciones metrológicas reales durante la medición de las piezas, incluyendo además de las influencias dadas por la calibración del instrumento de medición propiamente tal, aquellas provocadas por variaciones de temperatura, preparación de los operadores, etc.
- En el caso de inspecciones realizadas sobre un mismo tipo de piezas con diferentes instrumentos, es necesario que las incertidumbres de los diferentes SM sean lo más similares posibles. De esta forma, el modelo general podrá representar adecuadamente a los diferentes SM, sean ellos formados por instrumentos de medición iguales o diferentes. De lo contrario, sería necesario realizar estudios diferentes para cada tipo de SM.
- Tanto el proceso de fabricación como las indicaciones del SM deben tener distribución normal. Esta misma metodología, con algunas modificaciones podría ser empleada en el estudio de procesos con otras distribuciones desde que ellas sean conocidas, matemáticamente expresables e insesgadas (permitan la corrección de errores sistemáticos)
- Si bien la metodología es aplicable a cualquier tipo de procesos, ciertamente es más interesante para el caso de procesos incapaces. En procesos altamente capaces, la selección del SM no es tan crítica como en el caso de procesos incapaces.
- Para encontrar una solución al problema es necesario determinar la desviación estándar del proceso de fabricación verdadero, sin contaminación por causa del sistema de medición utilizado en la determinación de dicho parámetro (ver Figura 3). De esta forma, la desviación estándar verdadera, σ_{pv} , puede ser determinada a partir de la desviación estándar aparente del proceso de fabricación, σ_{pa} , y la desviación estándar del sistema de medición (σ_{sm}).

$$\sigma_{pv} = \sqrt{\sigma_{pa}^2 - \sigma_{sm}^2} \quad (2)$$

Esta ecuación es valida en la medida que no exista correlación entre ambas variables. Otro requisito importante es que el proceso de fabricación este sob-controlado estadístico, de modo de asegurar que los valores encontrados son estables

Para esto se define $f_1(Y)$ como la densidad de probabilidad de una función normal que entrega la probabilidad de que el proceso de fabricación verdadero tome el valor “y”. Proceso de fabricación verdadero se define como aquel proceso controlado por un SM ideal, es decir, con incertidumbre y error sistemático igual a cero (Figura 3).

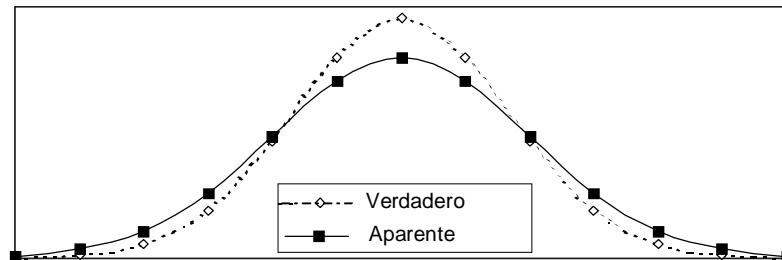


Figura 3: Variación del proceso de fabricación

Por su parte, se define $f_2(X/Y)$ como la densidad de probabilidad condicional normal, de una función que entrega la probabilidad de que el SM tome el valor X dado que la media del proceso de fabricación verdadero toma el valor Y. De acuerdo a los principios de probabilidad condicional (Johnson, Richard A., 1994), se desprende que, la densidad de probabilidades combinada, queda representada como:

$$f(X \cap Y) = f_1(Y) * f_2(X/Y) \quad (1)$$

Al integrar la ecuación (1), obtenemos la función de distribución respectiva $F(X \cap Y)$. Al evaluar la función de distribución entre diferentes límites, obtenemos la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los eventos posibles. Los eventos condicionales posibles son:

- PFPR: Probabilidad de que, piezas estando fuera de especificaciones por ser pequeñas, sean reprobadas,
- PFGR: Probabilidad de que, piezas estando fuera de especificaciones por ser grandes, sean reprobadas,
- PDA: Probabilidad de que, piezas estando dentro de especificaciones, sean aceptadas,
- PDRP: Probabilidad de que, piezas estando dentro de las especificaciones, sean rechazadas por ser consideradas pequeñas,
- PDRG: Probabilidad de que, piezas estando dentro de las especificaciones, sean rechazadas por ser consideradas grandes,
- PFAP: Probabilidad de que, piezas estando fuera de las especificaciones por ser pequeñas, sean aceptadas,
- PFAG: Probabilidad de que, piezas estando fuera de las especificaciones por ser grandes, sean aceptadas,
- PFPRG: Probabilidad de que, piezas estando fuera de las especificaciones por ser pequeñas, sean reprobadas por ser consideradas grandes,
- PFGRP: Probabilidad de que, piezas estando fuera de las especificaciones por ser grandes, sean reprobadas por ser consideradas pequeñas.

Los 3 primeros eventos corresponden a aquellos que no dependen del SM y sólo dependen de la capacidad del proceso de fabricación verdadero. Es decir aquellos eventos donde el SM no tiene ninguna influencia, incluso en el caso de disponer de un SM ideal.

Para mayor simplicidad, tomaremos como caso general de análisis el estudio de una pieza del tipo cilindro (dimensiones externas) con 1 dimensión crítica y con tolerancias bilaterales. La misma metodología es aplicable a piezas del tipo anillo (dimensiones internas), piezas con más de 1 dimensión crítica y piezas con tolerancias unilaterales, haciendo las adaptaciones correspondientes.

De disponer de un método de control ideal de piezas, podríamos identificar el proceso de fabricación verdadero. De esta forma se podrían distinguir 3 grupos; piezas buenas (se encuentran dentro de tolerancia), piezas malas pequeñas (dimensión crítica con valor menor al límite inferior de especificación) o piezas malas grandes (dimensión crítica con valor mayor al límite superior de especificación).

Para realizar las mediciones, necesariamente debemos utilizar métodos reales, los cuales presentan incertidumbre, esto debido a la imposibilidad de disponer de métodos ideales de control (sin incertidumbre). De esta forma la clasificación real (Figura 2) también está formada por 3 grupos; piezas aparentemente buenas, piezas aparentemente malas por ser consideradas pequeñas y piezas aparentemente malas por ser consideradas grandes:

- Piezas aparentemente buenas: Grupo formado por las piezas buenas (de acuerdo a la clasificación verdadera), piezas malas grandes aceptadas, piezas malas pequeñas aceptadas,
- Piezas aparentemente malas por ser pequeñas: Grupo formado por las piezas malas por ser pequeñas, piezas buenas erróneamente rechazadas, piezas malas por ser grandes mal clasificadas,
- Piezas aparentemente malas por ser grandes: Grupo formado por las piezas malas por ser grandes, piezas buenas erróneamente rechazadas, piezas malas por ser pequeñas mal clasificadas.

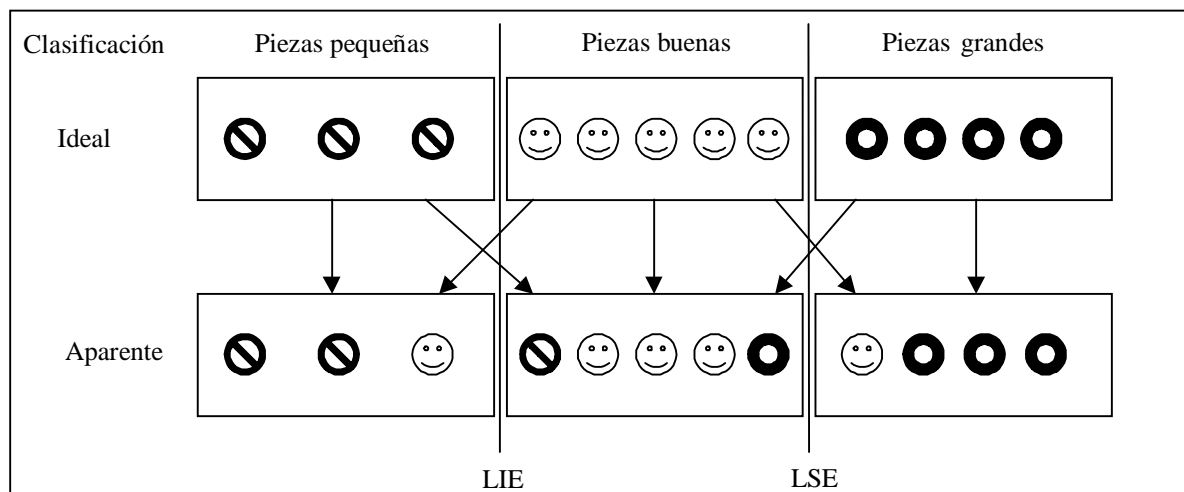


Figura 2. Clasificación ideal y aparente

3.1 Formulación probabilística

Nuestro objetivo será encontrar una función de distribución de probabilidad combinada que represente a la probabilidad de que una pieza sea clasificada como buena o mala, tomando en cuenta las variables establecidas en la Figura 1.

2. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad existen una serie de metodologías empleadas para la determinación de la adecuabilidad de los medios de medición, tal como lo plantea (Schoeler, Donoso, 1999). A continuación se presentan aquellos más utilizados. La terminología esta de acuerdo al Vocabulario Internacional de Metrología (INN, NCh2450):

- De acuerdo a la resolución del instrumento: Considera adecuada la utilización de instrumentos de medición con resolución entre un 10% a un 33% de la tolerancia.
- De acuerdo al error máximo del instrumento: Considera adecuada la utilización de instrumentos de medición con error máximo dentro del rango de medición de un 25% de la tolerancia.
- De acuerdo a la incertidumbre del instrumento de medición: Considera adecuada la utilización de instrumentos de medición con incertidumbre entre un 10% a un 33% de la tolerancia.

Existen otros métodos para evaluar la adecuabilidad de un sistema de medición; entre los más modernos, podemos mencionar aquellos establecidos por ISO (norma ISO 14253-1) y por MSA - QS 9000 (Chrysler, Ford y General Motors, 1997).

Ninguna de las metodologías planteadas encima, entrega todas las herramientas para tomar una decisión correcta. En particular, ninguna de ellas, exceptuando a MSA, toma en cuenta directamente la variabilidad del proceso de fabricación de las piezas que deben ser inspeccionadas. De esta forma, se estaría tomando una misma decisión, tanto para un proceso con índice de capacidad (C_p o C_{pk}) alta, de otro con índice bajo. Por último, ninguno de los métodos es sensible a los costos asociados a errores de clasificación, de esta forma, piezas de costos altos y de costos bajos serían igualmente tratadas.

3 METODOLOGIA PROPUESTA

Tomando en consideración el estado actual del arte es necesario buscar una nueva forma de atacar dicha problemática. De esta forma, la metodología propuesta pretende encontrar una relación entre los siguientes parámetros de interés: incertidumbre del sistema de medición, variabilidad del proceso de fabricación, tolerancias y costos involucrados.

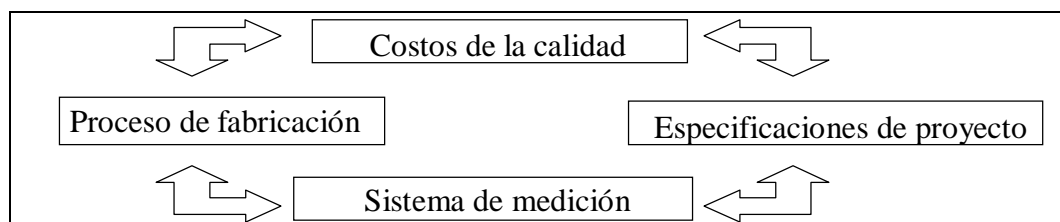


Figura 1. Metodología propuesta

La meta es encontrar una ecuación matemática que permita identificar la probabilidad de ocurrencia de errores de clasificación, debido a la variabilidad del proceso de fabricación de la pieza, de la tolerancia y de la incertidumbre del SM. En la medida que sea posible cuantificar la probabilidad de ocurrencia de cada evento, y asociando un costo a la ocurrencia de cada evento, sería posible determinar el costo asociado a cada posible solución.

SELECCIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN, UN PROBLEMA DE COSTOS

José Donoso Urrutia

Carlos Alberto Schneider

Universidade Federal de Santa Catarina, LABMETRO, Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, 88040-970, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: jiu@labmetro.ufsc.br

Resumen

Históricamente, la tarea de definir el sistema de medición más adecuado para una tarea en particular, se basaba en alguna relación entre Tolerancia de Proyecto e Incertidumbre de Medición. El presente trabajo plantea un criterio de selección de sistemas de medición para tareas de inspección, que toma en cuenta no sólo esos aspectos, sino que, además la capacidad del proceso de fabricación de las piezas en cuestión y los costos asociados a errores de clasificación. De esta forma, la decisión, no sólo depende de la relación entre especificaciones a cumplir y desempeño del sistema de medición, sino que también de la distribución del proceso de fabricación y de los costos asociados a los respectivos errores de clasificación.

Palabras-claves: Metrología, Calidad, Costos, Adecuabilidad

1. INTRODUCCIÓN

Para realizar correctamente una tarea de medición, es necesario disponer de un "Sistema de Medición", SM, adecuado. Cuando nos referimos a un SM, nos referimos, no sólo a un patrón o un instrumento de medición, sino que a todos aquellos factores que afectan el resultado de dicha medición. Es decir; capacidad de los operadores, procedimiento y método de medición, condiciones ambientales, algoritmos de cálculo, etc.

Para definir el SM mas adecuado para una tarea de medición en particular, normalmente se emplea una relación entre la Tolerancia de Proyecto, y la Incertidumbre del SM. Sin embargo, existen otras variables que influyen en la pertinencia de la elección de una solución u otra, tales como la variabilidad del proceso de fabricación y los costos asociados a los errores de clasificación.

La variabilidad del proceso de fabricación determina el número de piezas que son producidas fuera de especificación y de aquellas que son producidas en los límites de tolerancia. De esta forma la incertidumbre del SM será más crítica en la medida que existan más piezas producidas entorno a los límites. De la misma forma, los costos totales de errores serán más importantes en la medida que existan más piezas propensas a ser mal clasificadas y en la medida que los costos asociados a errar sean mayores.