

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

***DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA
INFORMÁTICO Y DE LA METODOLOGÍA PARA EL
ANÁLISIS DE DATOS, EN EL ASEGURAMIENTO DE
LA CALIDAD DE LOS SERVICIOS DE LOS
LABORATORIOS DE METROLOGÍA DE CIDESI.***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN: *CIENCIA Y TECNOLOGÍA*

CON ESPECIALIDAD EN: *METROLOGÍA.*

PRESENTA:

ING. MARIO DAGOBERTO DÍAZ ORGAZ

DIRECTORA DE TESIS. M. C. MARTHA GUTIERRÉZ MUNGUÍA

QUERÉTARO, QRO. AGOSTO 2015

AGRADECIMIENTO.

A través de este trabajo agradezco a Dios por darme siempre ahínco, voluntad, deseos de conocimiento y por colocarme misteriosamente en el mundo fascinante de las mediciones.

A mi familia por siempre creer en mí, por el ejemplo de humildad y sacrificio.

A mis amigos por su constante presencia.

A las personas que amablemente quisieron colaborar con este trabajo.

DEDICATORIA.

Este trabajo lo dedico a mis compañeros de la Dirección de Metrología del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.

A todos los colegas de Metrología con quienes he tenido el privilegio de debatir, discutir y trabajar.

ÍNDICE:

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| RESUMEN..... | 12 |
| OBJETIVOS. | 15 |
| GENERAL. | 15 |
| ESPECÍFICOS. | 15 |
| MARCO TEÓRICO..... | 16 |
| CAPÍTULO 1: HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA CONTROLES DE CALIDAD. | 18 |
| 1. GENERALIDADES..... | 18 |
| 1.1. DISTRIBUCIÓN NORMAL. | 19 |
| 1.2. TEOREMA DEL LÍMITE CENTRAL. | 20 |
| 1.3. VARIABILIDAD EN LOS PROCESOS DE MEDICIONES. | 22 |
| 1.4. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS DE USO EN LOS PROCESOS DE MEDICIONES: 23 | |
| 1.5. DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS..... | 23 |
| 1.5.1. CONSISTENCIA DE RESULTADOS..... | 27 |
| 1.5.2. ESTABLECIMIENTO DEL VALOR X_{VA} O X_{REF} CONSIDERADO COMO “VERDADERO”. | 30 |
| CAPÍTULO 2. MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA PRUEBAS DE CONSISTENCIA EN LA IDENTIFICACIÓN DE DATOS RAROS. | 37 |
| 2. GENERALIDADES..... | 37 |
| 2.1. PRUEBAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE DATOS RATOS..... | 38 |
| 2.1.1. MODELOS MATEMÁTICOS PARA PRUEBAS DE CONSISTENCIA UTILIZANDO LOS INDICADORES MANDEL. | 38 |
| 2.1.2. IDENTIFICACIÓN DE DATOS RAROS POR TÉCNICAS NUMÉRICAS. | 41 |
| 2.1.3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE RÉPLICAS, n | 45 |
| CAPÍTULO 3. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PROPUESTAS PARA ANÁLISIS DE DATOS O RESULTADOS DE LAS MEDICIONES. | 46 |
| 3. GENERALIDADES..... | 46 |
| 3.1. INCERTIDUMBRE DE MEDIDA. | 46 |
| 3.2. CRITERIO DEL ERROR NORMALIZADO, E_n | 54 |
| 3.3. CALIFICACIÓN ξ o z SCORE..... | 57 |
| 3.4. ANÁLISIS DE VARIANZA. | 58 |
| 3.5. PRUEBA FISHER, F | 61 |

| | | |
|--|--|-----|
| 3.6. | PRUEBA CHI CUADRADA (χ^2)..... | 63 |
| 3.7. | ERROR MEDIO CUADRÁTICO..... | 65 |
| 3.7.1. | GENERALIDADES..... | 65 |
| 3.7.2. | DETERMINACIÓN DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO..... | 66 |
| 3.7.3. | DETERMINACIÓN DEL VALOR DE COMPARACIÓN DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO..... | 68 |
| 3.8. | RELACIÓN DE BIRGE (R_B)..... | 71 |
| 3.8.1. | DEFINICIÓN DE LA REALCIÓN DE BIRGE..... | 71 |
| 3.8.2. | USO DE LA RELACIÓN DE BIRGE EN COMPARACIONES INTERNACIONALES. 72 | |
| 3.8.3. | RELACIÓN DE BIRGE DE COMPARACIÓN PARA LABORATORIOS DE CALIBRACIÓN..... | 74 |
| 3.8.4. | CONSIDERACIONES DEL VALOR ASIGNADO (X_{VA})..... | 76 |
| CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL SISTEMA INFORMÁTICO PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.. | | 79 |
| 4.1. | GENERALIDADES..... | 79 |
| 4.2. | ASCAL: ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD..... | 82 |
| 4.2.1. | INTRODUCCIÓN..... | 82 |
| 4.2.2. | OBJETIVO DEL MANUAL..... | 82 |
| 4.2.3. | REQUERIMIENTOS..... | 82 |
| 4.2.4. | OPCIONES DEL SISTEMA..... | 83 |
| 4.2.5. | ACCESO A LA APLICACIÓN..... | 83 |
| 4.2.6. | INICIO DE SESIÓN..... | 83 |
| 4.2.7. | USUARIOS..... | 84 |
| 4.2.8. | CATÁLOGOS..... | 85 |
| 4.2.9. | ALTA DE ASEGURAMIENTO..... | 90 |
| 4.2.10. | PARTICIPANTE CAPTURA DE DATOS..... | 92 |
| 4.2.11. | ANÁLISIS DE DATOS E INFORMES PRELIMINAR..... | 95 |
| 4.2.12. | PUBLICAR RESULTADOS..... | 99 |
| CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LOS CONTROLES DE CALIDAD. | | 101 |
| 5.1. | GENERALIDADES..... | 101 |
| 5.2. | ACLARACIÓN SOBRE ECUACIONES UTILIZADAS EN EL CAPÍTULO 5..... | 101 |
| 5.3. | INTRODUCCIÓN..... | 102 |
| 5.4. | OBJETIVO..... | 103 |
| 5.5. | ALCANCE DE LA METODOLOGÍA..... | 103 |
| 5.6. | DEFINICIONES..... | 104 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 5.6.1. | ERROR NORMALIZADO..... | 107 |
| 5.6.2. | ERROR MEDIO CUADRÁTICO..... | 107 |
| 5.6.3. | RELACIÓN DE BIRGE..... | 109 |
| 5.6.4. | INDICADORES MANDEL..... | 110 |
| 5.6.5. | ANÁLISIS DE VARIANZA..... | 112 |
| 5.6.6. | PRUEBA F..... | 113 |
| 5.7. | RESPONSABILIDADES Y AUTORIDADES..... | 114 |
| 5.8. | PROTOCOLO DE INTERCOMPARACIÓN..... | 114 |
| 5.9. | DESARROLLO DE LOS CONTROLES DE CALIDAD Y HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA GARANTIZAR LA CALIDAD LOS PROCESOS DE MEDICIÓN/CALIBRACIÓN. ESPECIFICACIONES..... | 118 |
| 5.9.1. | COMPARACIONES INTERNAS O EXTERNAS. USO DEL CRITERIO DEL ERROR NORMALIZADO..... | 119 |
| 5.9.2. | OTRAS TÉCNICAS ESTADÍSTICAS DE USO EN EL LABORATORIO..... | 120 |
| 5.9.2.1 | ERROR MEDIO CUADRÁTICO..... | 120 |
| 5.9.2.2. | RELACIÓN DE BIRGE..... | 121 |
| 5.10. | SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE LOS CONTROLES DE CALIDAD: ASCAL. | 121 |
| 5.11. | EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA A TRAVÉS DE LA TÉCNICA DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO..... | 122 |
| 5.12. | EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA A TRAVÉS DE LA TÉCNICA LA RELACIÓN DE BIERGE..... | 123 |
| | CONCLUSIONES..... | 124 |
| | CONCLUSIONES GENERALES..... | 124 |
| | CONCLUSIONES PARTICULARES..... | 125 |
| | LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURO..... | 125 |
| | ANEXO A: EJERCICIO DE COMPARACIÓN ENTRE LABORATORIOS UTILIZANDO LAS TÉCNICAS DEL \bar{x}_{SMi} Y R_B | 126 |
| A1. | GENERALIDADES..... | 126 |
| A2. | ESTABILIDAD DEL INSTRUMENTO..... | 127 |
| A3. | RELACIÓN DE BIRGE..... | 128 |
| A4. | ERROR CUADRÁTICO MEDIO (δ_{RMS})..... | 128 |
| A5. | DESEMPEÑO GENERAL DEL EJERCICIO DE EA..... | 131 |
| A6. | INCERTIDUMBRES DE MEDIDA..... | 131 |
| A7. | DESVIACIONES RESPECTO AL VALOR DE REFERENCIA..... | 131 |
| | ANEXO B. VALORES DE INDICADORES MANDEL h Y k PARA EL 1%..... | 132 |

| | |
|---|-----|
| ANEXO B. VALORES DE INDICADORES MANDEL h Y k PARA EL 5%. Continuación. | 133 |
| ANEXO C. VALORES CRÍTICOS PARA LA PRUEBA DE COCHRAN. | 134 |
| ANEXO D. VALORES CRÍTICOS PARA LA PRUEBA DE GRUBBS. | 135 |
| ANEXO E. VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F. | 135 |
| ANEXO F. VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN χ^2 | 136 |
| ANEXO F. VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN χ^2 . Continuación. | 137 |
| BIBLIOGRAFÍA. | 138 |
| LIBROS. | 138 |
| NORMAS. | 138 |
| ARTÍCULOS CONSULTADOS. | 139 |
| SIMBOLOGÍA. | 140 |
| TÉRMINOS Y DEFINICIONES. | 141 |
| TÉRMINOS REFERIDOS A LA ESTADÍSTICA: | 144 |

INTRODUCCIÓN.

Históricamente la Metrología ha colaborado, conjuntamente con las otras ciencias y de manera muy particular por la responsabilidad de esta ciencia con los resultados de todas las mediciones, en el desarrollo del ser humano, su entorno, su hábitat, su confort, su vestimenta, su alimentación, su salud y su descanso a través de las innovaciones en las técnicas de medición, del perfeccionamiento de los patrones nacionales e internacionales que definen las unidades de medida, del desarrollo de los sistemas de medición y métodos de medida que le posibiliten medir y garantizar que dicha medición es correcta y por supuesto del desarrollo que se alcanza en el diseño y fabricación de instrumentos de medida con los niveles de exactitud que se requieren en cada momento y que cada vez parecen trasgredir la barrera de lo temporal y humanamente impensable como lo es, por ejemplo, hablar hoy día de manera muy coloquial de la era de la nanotecnología.

Sin embargo la Metrología necesita de otras ciencias para lograr su encomienda. Por ello hace alianza o enmarca un tronco común con la Física, la Química, las Matemáticas, la Probabilidad y finalmente, pero no menos importante con la Estadística y sus herramientas de análisis.

La Estadística entonces es el marco de análisis de todo lo que puede ser medido; sin importar el tipo de método o el patrón.

El universo de objetos o hechos se puede plantear en el orden siguiente de ideas:

El universo desconocido:

- Lo inconcebible: Todo lo que no puede ser pensado desde un punto de vista lógico y racional, es decir todo lo que es incapaz de ser imaginado por la mente humana.
- Lo imposible: Todo lo que se encuentra en el espacio de tiempo en que vivimos y es imposible para nosotros, no puede existir, no puede ocurrir, no puede realizarse.

El universo conocido:

- Lo viable: Lo que podemos realizar.
- Lo probable: El universo que podemos probar, que es muy posible que se cumpla o suceda.
- Lo imaginable: Lo que es posible preconcebir en nuestro espacio temporal.
- Lo deseable: Todos los hechos u objetos conocidos, temporalmente fuera de nuestro alcance, pero que deseamos.

El mundo de la Metrología abarca los hechos del universo conocido.

El alcance de este universo de objetos y hechos va de lo que no podemos humanamente describir, por la propia condición inimaginable de los hechos, hasta lo que podemos preconcebir, desear o planear.

La Estadística tiene el dominio de todo lo probable.

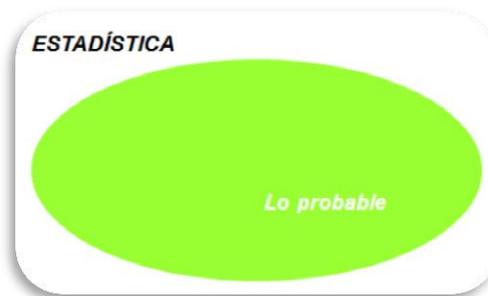


Figura 1. Lo probable es el dominio de la Estadística y la Probabilidad.

El progreso alcanzado por la humanidad ha sido posible gracias al incremento del número y variedad de productos que la industria proporciona. Para ello la industria en general se ha visto en la necesidad de migrar a formas de producción en serie. El desarrollo de productos y las fuertes demandas de los mismos no son exclusivos de un país determinado, ni siquiera de un continente, sino que se observa a escala internacional. Para ello la industria simplemente ha tenido que revertir la otrora condición artesanal y local a formas masivas a escalas internacionales que han sido posible gracias al desarrollo del concepto de intercambiabilidad, es decir, producir partes y componentes bajo normas de producción, con características y tolerancias bien definidas para cada parte de manera tal que pueda realizarse el ensamble del producto a partir de la elección particular de sus componentes individuales y que esto se realice sin fallas.

Esta exigencia de productos tan variables, sofisticados tecnológicamente y con cada vez mayor exigencia de calidad se hace cada vez más notoria y para lograrla es imprescindible aumentar considerablemente las mediciones en los procesos de producción y el control de calidad en las plantas de producción. Este control tiene que abarcar, sin ser exclusivos, aspectos tales como la normalización de los criterios de diseño, el uso de tolerancias que garanticen la realización de los correspondientes ajustes, la comprobación sistemática de las máquinas herramientas, el control de la calidad de las partes producidas a través de instrumentos de medición calibrados y algo de suma importancia y que lastimosamente no se conoce ni se difunde suficientemente entre los usuarios finales de los productos: los controles de calidad a los procesos metrológicos de las mediciones.

En este punto es que la Metrología se encuentra con retos cada vez más complejos, que necesitan de la investigación, innovación y desarrollo de procedimientos de medida que permitan servir a las exigencias del propio desarrollo de la ciencia y la tecnología en todas las áreas. Esta evolución tiene que establecerse en dos líneas de trabajo de manera paralela: en la investigación y en el desarrollo.

En las actividades de investigación la Metrología realiza trabajos enfocados a la garantía de que las mediciones y sus resultados sean intercomparables, desarrolla la mejora en los métodos de análisis de datos, innova en el desarrollo de nuevos métodos de medición, procura el avance en el conocimiento de las magnitudes de influencia, trabaja en la generalización de un esquema de trazabilidad metrológica equivalente a nivel mundial. Por su parte el desarrollo tiene que ir hacia las nuevas tecnologías metrológicas que incorporen materiales avanzados, la automatización en el proceso de medida y la electrónica en apoyo a los niveles de resolución necesarios que garanticen el nivel de exactitud, cada vez superior, para las mediciones.

En la actualidad, la Metrología industrial, específicamente la Metrología Dimensional, se encuentra a un nivel de desarrollo tal que, hablar de exactitudes en esta área del orden de micrómetros queda en el pasado. Hoy día las industrias mecánicas, aeronáuticas, de desarrollos de nuevos materiales y la nanotecnología obligan a la revisión de niveles de exactitud del orden de los nanómetros y décimas de ellos, con su implicación en el desarrollo y soporte para ese tipo de mediciones. En cualquier proceso de fabricación de partes y piezas, se hace imprescindible la utilización de equipamiento de medición tal que se garantice la exactitud dimensional de los productos obtenidos. La causa de este desarrollo procede en parte de la necesidad de asegurar la uniformidad de los productos, garantizando la intercambiabilidad de los mismos.

Si a todo ello se suma el hecho de que nosotros mismos, como consumidores, nos regimos cada vez más por patrones globales de consumo, resulta imprescindible establecer una infraestructura técnica que actúe como elemento central de cara a la coordinación y organización a nivel global para las actividades de medición y calibración.

En este sentido, uno de los principales objetivos debe ser el desarrollo de metodologías para garantizar la calidad de las mediciones a fin de garantizar la propia uniformidad de los resultados obtenidos para, de esta forma, favorecer la comparación de los mismos. Ejemplo de avances en este sentido pueden ser la adopción y reconocimiento de un sistema internacional de unidades de medida y, en un contexto más específico, los documentos que se generan relativos a las estimaciones de las incertidumbres de las mediciones [6][7] y las guías técnicas de trazabilidad e incertidumbres.

Además, esta situación se hace especialmente delicada cuando se aplica a la producción de datos derivados de las actividades de medición [5] y que es evaluada de manera consistente y periódica por entes externos de evaluación, observación y decisión, tanto en relación con el desarrollo de las propias actividades de medición, como con las actividades de la evaluación de los resultados que derivan de ella como por ejemplo el proceso de acreditación de un laboratorio metrológico o la evaluación como proveedor confiable por parte de los clientes.

Asimismo, la evaluación de la calidad afecta no sólo a un entorno cercano, sino que alcanza un nivel mucho más global, por lo que resulta fundamental disponer de fuentes documentales suficientemente robustas y unificadas que permitan desarrollar de la forma más completa, rigurosa y unificada la actividad del aseguramiento de la calidad de las mediciones.

RESUMEN.

El objetivo de la presente tesis de maestría es el desarrollo de un proceso general para la evaluación de la calidad de los datos y de la herramienta informática que facilite dicho análisis en los laboratorios de Metrología del CIDESI en todas sus sedes.

El ámbito del trabajo, si bien es aplicable a cualquier tipo de mediciones que se realicen en los laboratorios de calibración del CIDESI, se ha decidido realizarlo de manera específica y como introducción en el campo de la Metrología Dimensional, por ser esta la magnitud que el CIDESI ha desarrollado en todas las sedes en donde tiene presencia.

Para la valoración de la calidad de una medición, existe en la actualidad en los laboratorios de calibración del CIDESI dos métodos fundamentales de análisis:

- Análisis de la desviación a través del criterio de error normalizado, ***En*** [10].
- Técnicas gráficas de consistencia para el análisis de la calidad entre los datos utilizando los indicadores Mandel de consistencia ***h*** y ***k*** [9].

El primero criterio posibilita determinar la variación de una medición englobando errores e incertidumbres de medida. El segundo método ayuda a evaluar la consistencia de los datos en el rango dentro del cual cierta variación se podría encontrar sin afectar a los resultados. Ambos métodos, facilitan la determinación de un indicador de la calidad de las mediciones.

El uso de herramientas estadísticas para el control de los procesos de medición y comprobación de la información que obtenemos de los instrumentos de medición, es un factor clave para el soporte de los procesos de medición, la calibración de los instrumentos de medición, el ajuste a los mismos, si es necesario, y su correspondiente repercusión en la calidad.

La tesis está conformada por varias secciones bien definidas. Comienza con la introducción, resumen, objetivos, marco teórico, seguida de cinco capítulos, y cinco anexos, incluyendo conclusiones, bibliografía, símbolos y términos y definiciones.

En primera instancia se desarrolla una introducción como encuadre del avance de la Metrología a través del desarrollo de la humanidad. A continuación continúa un resumen, los objetivos general y específicos de la tesis y el marco teórico que ha motivado a la generación de la misma.

El primer capítulo se dedica a exponer las generalidades de las herramientas estadísticas para el control de la calidad, como fundamentos teóricos a ser empleados en el desarrollo de los subsecuentes capítulos. Se establecen guías rápidas para el desarrollo de experimentos. De igual

manera se hace particular énfasis en la estimación de la incertidumbre de medida, que también es, en todos los casos de las mediciones, una herramienta de control.

El capítulo 2 está dedicado a los métodos estadísticos para las pruebas de consistencia propuestas para la identificación de datos raros, tema este primordial para no falsear la información metrológica producida como resultado de las calibraciones o mediciones.

A través del capítulo 3 se hace la propuesta de herramientas estadísticas convenientes para el análisis de datos, divididas en dos subgrupos importantes:

- a. Pruebas generales para el análisis de datos: calificación ξ ; prueba F , análisis de varianza, que pueden ser realizadas por el laboratorio, sin la necesidad de concurso de otro laboratorio participante.
- b. Pruebas específicas para laboratorios de calibración que involucran tanto los errores como las incertidumbres de medida para la realización del análisis de datos: error normalizado En , error medio cuadrático δ_{MSi} y relación de Birge R_B , definiéndose para estos estimadores los valores críticos para comparación.

El cuarto capítulo se dedica a introducir el desarrollo del sistema informático para el análisis de los datos resultantes de las mediciones.

En el capítulo 5 se presenta la metodología para el control de la calidad de los datos de las mediciones y/o calibraciones.

Finalmente se incluyen las conclusiones y recomendaciones generales y particulares que se han obtenido de este trabajo, así como una propuesta de las posibles líneas de trabajo futuro que de ella pueden originarse.

En el cuerpo de la tesis se incluyen la relación de la bibliografía que se ha utilizado en el desarrollo de esta tesis y seis anexos más presentados en el siguiente orden:

- ANEXO A: Ejercicio de comparación utilizando la técnica del δ_{SMi} y R_B .
- ANEXO B: Valores de indicadores Mandel h y k para el 1% y el 5%.
- ANEXO C: Valores críticos para la prueba de **Cochran**.
- ANEXO D: Valores críticos para la prueba de **Grubs**.
- ANEXO E: Valores críticos de la distribución F .
- ANEXO F: Valores críticos de la distribución χ^2 .

Los anexos desarrollan temas o partes que, por su contenido o extensión, pueden dificultar el seguimiento lineal de la exposición, habiéndose segregado del cuerpo central de los capítulos correspondientes, donde se les llama a referencia.

OBJETIVOS.

GENERAL.

Establecer la metodología y crear la herramienta informática para el análisis de los datos producidos por los laboratorios de Metrología del CIDESI.

ESPECÍFICOS.

1. Establecer el conjunto de herramientas estadísticas que pueden ser utilizadas en el análisis de datos de los laboratorios.
2. Seleccionar las metodologías a aplicar para el análisis de datos agrupadas por tipos de análisis.
3. Describir cada una de las metodologías que se seleccionen.
4. Definición de estimador para la comparación de los resultados para el error medio cuadrático δ_{MSi} y relación de Birge R_B .
5. Interpretación de resultados.
6. Desarrollo de procedimiento para el control de la calidad de los datos.
7. Desarrollo de la herramienta informática de análisis.

MARCO TEÓRICO.

Cuando un metrologo debe realizar la calibración de un instrumento de medición o la medición de un ítem se enfrenta a múltiples decisiones, influyendo en ellas, el nivel de formación que posea.

Generalmente los laboratorios ofrecemos una apropiada capacitación a los metrologos en cuanto a las actividades de calibraciones y mediciones que debe realizar incluyendo la habilidad para la selección de métodos específicos para las mediciones, la elección de instrumentos de medición más idóneos para realizar dicha medición en cuanto a niveles de exactitud y trazabilidad metrológica, la habilidades para el conocimiento de los posibles errores de medida y cómo evitarlos o minimizarlos en cada tipo de proceso de medición y finalmente la capacidad de expresar el resultado medido de acuerdo a un esquema de cálculo consistente e involucrando la incertidumbre de medida.

Sin embargo una de las limitaciones más grandes radica en que no ponemos a su alcance las herramientas estadísticas, simples o complejas, para el análisis de los datos producto de estas mediciones y la capacidad del mismo operador para poder discernir de la calidad de sus mediciones al no contar con criterios propios de los métodos de calibración para los diferentes instrumentos, que dicho sea de paso, no deberían ser evaluados como “instrumentos nuevos” bajo las normativas para ellos desarrolladas por los fabricantes, fundamentalmente, debido a que la mayoría se encuentra en uso.

En los últimos años la entidad mexicana de acreditación (ema) ha hecho mucho énfasis en la calidad de los datos, desarrollando criterios específicos para evaluar el cumplimiento de los laboratorios con el requisito sobre el aseguramiento de la calidad de los resultados de ensayo y calibración

En los procesos de medición que realizan los laboratorios de Metrología del CIDESI, como en otros laboratorios de calibración, es necesario el desarrollo de una metodología y pueden ser de mucha ayuda desarrollos informáticos que permitan medir y evaluar la calidad de los datos que se producen de manera sistemática, teniendo criterios estadísticos que faciliten la interpretación de los datos y sus tendencias.

La tesis pretende afrontar esta problemática en su globalidad y en la particularidad de los laboratorios de calibración y medición del área de Dimensional, tratando de proponer herramientas estadísticas básicas para el análisis de los datos producidos por los laboratorios en el trabajo cotidiano y herramientas estadísticas que posibiliten la comparabilidad de los resultados entre los

metrólogos de un mismo laboratorio, de diferentes laboratorios del propio CIDESI y con laboratorios expertos externos.

Adicionalmente se presenta el desarrollo de una herramienta estadística que englobe algunas de estos criterios de análisis quedando abierta la posibilidad de incorporar otras magnitudes físicas y otros criterios de evaluación en dependencia a la necesidad.

CAPÍTULO 1: HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA CONTROLES DE CALIDAD.

1. GENERALIDADES.

En Metrología hay que establecer y definir claramente el diseño de experimento [1], [2] y las consecuentes herramientas estadísticas para el análisis de los datos producto de las mediciones.

La variabilidad que se observa en los procesos de producción, también es un problema para el campo de la Metrología. Son muchas los contextos en las que las variaciones originan dudas significativas en los procesos de medición. En muchas de estas circunstancias no se posee información precisa y suficiente sobre cómo se genera esta variación.

Es bien conocido que no existen dos mediciones exactamente iguales y a pesar que las desviaciones entre ellas pueden ser mínimas siempre existirá la variabilidad. Claramente aquí se pone en contexto el concepto de incertidumbre de media con el enfoque preciso de observarla como la variabilidad que puede ser razonablemente estimada para cada proceso concreto de medición independientemente a que se realicen en condiciones de repetibilidad. Conocer cuál es el resultado de la variación esperable y disponer de modelos matemáticos por tipos concretos de mediciones que expliquen las causas que generan esta variabilidad es la base para evaluar y tomar decisiones para la mejora continua.

La variabilidad que se observa a la salida de un proceso de medición es producto de la que se genera y se trasmite a lo largo del desarrollo del mismo en sus diferentes etapas [5]. El desconocimiento del comportamiento de cada variable en cada etapa del proceso de medición - por ejemplo la temperatura y las variaciones de la misma, los ruidos externos, vibraciones, posicionamiento de las piezas, formas de fijación, entre otros muchos - puede llevar a subvalorar el efecto de algunas, a subestimar o sobreestimar las incertidumbres de medida y a controles de calidad que no están acorde con las propias necesidades.

En los procesos de medición también pueden existir factores de variación que no afectan al resultado final promedio de las mediciones, pero sí a su variación e inclusive casos en los que el efecto de estos factores sobre la variabilidad no puede medirse directamente y solo puede estimarse a partir de su efecto en la respuesta.

Cuando son procesos de medición robustos, durante el proceso de estimación de la incertidumbre determinamos el peso de cada variable en el resultado final. A este proceso lo denominamos balance de incertidumbres. Es muy útil el desarrollo, conocimiento y entendimiento de estos

balances porque posibilitan conocer las variables que afectan más a cada proceso de medición y por supuesto, permite un mejor control de las mismas.

La variabilidad mínima inherente a los procesos trabajando en condiciones estables suele denominarse variabilidad natural o ruido de fondo y resulta del efecto acumulado de muchas pequeñas causas localizadas a lo largo del proceso que son básicamente inevitables y que se conocen como causas comunes. Cuando el ruido de fondo de un proceso es aceptablemente pequeño y se considera que es el mínimo alcanzable se dice que es un sistema estable de causas aleatorias. Un proceso en el que su variabilidad solo sea consecuencia de estas causas aleatorias, también llamadas comunes se dice que está bajo control estadístico.

En los procesos cuya variabilidad es solo consecuencia de las causas comunes habitualmente se distribuyen según un modelo probabilístico normal $N(\mu, \sigma)$ cuya media μ coincide con el valor nominal y su variación se cuantifica a partir del valor de la desviación típica σ o varianza σ^2 [5].

Si bien los valores individuales pueden no distribuirse según la ley normal, sí lo hacen las medidas de las muestras de n mediciones, lo que remarca el teorema del límite central, que resumiremos más adelante. La representación habitual de los valores obtenidos a la salida de estos procesos suele corresponder a un comportamiento de los valores puramente aleatorio dentro de un intervalo que podemos considerar como el de variación natural definido como $\pm 3\sigma$ y en el que se puede pensar que las diferencias entre valores obtenidos en muestras distintas son puramente aleatorias y solo consecuencia de estas causas comunes.

1.1. DISTRIBUCIÓN NORMAL.

Una de las distribuciones más importantes en el campo de la estadística es la distribución normal [1]. Su gráfica recibe el nombre de curva normal, esta describe situaciones que ocurren en la industria, en la naturaleza y en la investigación.

Una variable aleatoria continua que tiene una distribución en forma de campana se le llama variable aleatoria normal y su ecuación depende de la media y desviación estándar de dicha distribución, figura 2.

La notación para esta variable que se distribuye normalmente es $x \approx N(\mu, \sigma^2)$,

Esta distribución es simétrica, unimodal y en forma de campana. Las áreas entre las diferentes desviaciones estándar son:

$$\mu \pm 1\sigma; 68.26\%$$

$$\mu \pm 2\sigma; 95.46\%$$

$$\mu \pm 3\sigma; 99.73\%$$

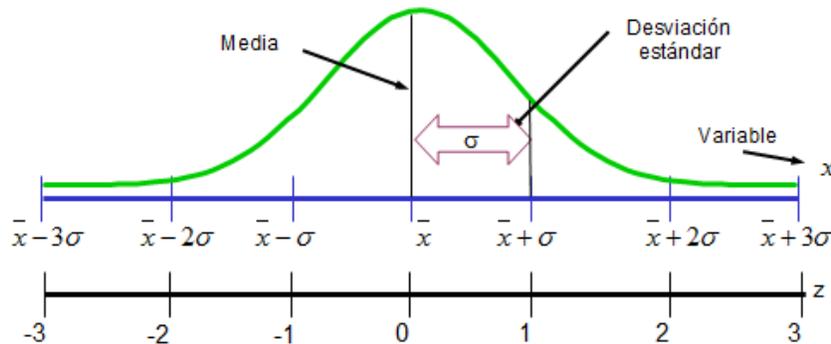


Figura 2. Curva de la distribución normal

1.2. TEOREMA DEL LÍMITE CENTRAL.

Si en un proceso hay variabilidad, la cual siempre existe, esta puede afectar a la calidad de un producto, por lo que estas características o variables se monitorean mediante la aplicación de la estadística. Uno de los conceptos importantes en la distribución de datos es el teorema del límite central.

La distribución normal tiene varias propiedades útiles, una de estas se refiere a la combinación lineal de variables aleatorias independientes: Si $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son variables aleatorias independientes no necesariamente normales, con medias $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ y varianzas $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$ respectivamente, entonces la distribución del estadístico es normal: $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$.

El teorema de límite central es generalmente una justificación de aproximarse a la normalidad.

Si \bar{x} es la media de una muestra aleatoria de tamaño n tomada de una población con media μ y varianza finita σ^2 , entonces la forma límite de la distribución es:

$$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (1)$$

se aproxima a una distribución normal, conforme n se aproxima al infinito.

Es decir que la suma de las n variables aleatorias independientemente distribuidas es aproximadamente normal, independientemente de la distribución de las variables individuales.

La aproximación se mejora conforme se incrementa n , en general si las x_i están distribuidas en forma idéntica y su distribución se asemeja a la normal, el teorema del límite central trabaja bien para $n \geq 3 \text{ ó } 4$, condiciones propicias para el control de calidad y estadístico de los procesos.

En varios casos la aproximación es buena para una pequeña n , es decir $n < 10$, aunque en algunos casos se requiere de una n muy grande, es decir $n > 100$, para que la aproximación sea satisfactoria. La aseveración del párrafo anterior puede incluir lo siguiente: en general, si la x_i está idénticamente distribuida, y la distribución de cada x_i no parte radicalmente de la normal, entonces el teorema del límite central trabaja absolutamente bien para $n \geq 3 \text{ ó } 4$.

La distribución normal es un instrumento para la interpretación de las gráficas de control o el fundamento estadístico de la gráfica de control [4] es el teorema del límite central, el cual nos indica que aun cuando la población bajo estudio no tenga una distribución normal, el agrupamiento de los promedios tiende a tenerla, incluso en tamaño de muestras menores de 4, ver figura 3.

Usando un ejemplo hipotético donde 300 datos pueden estar distribuidos como sigue:

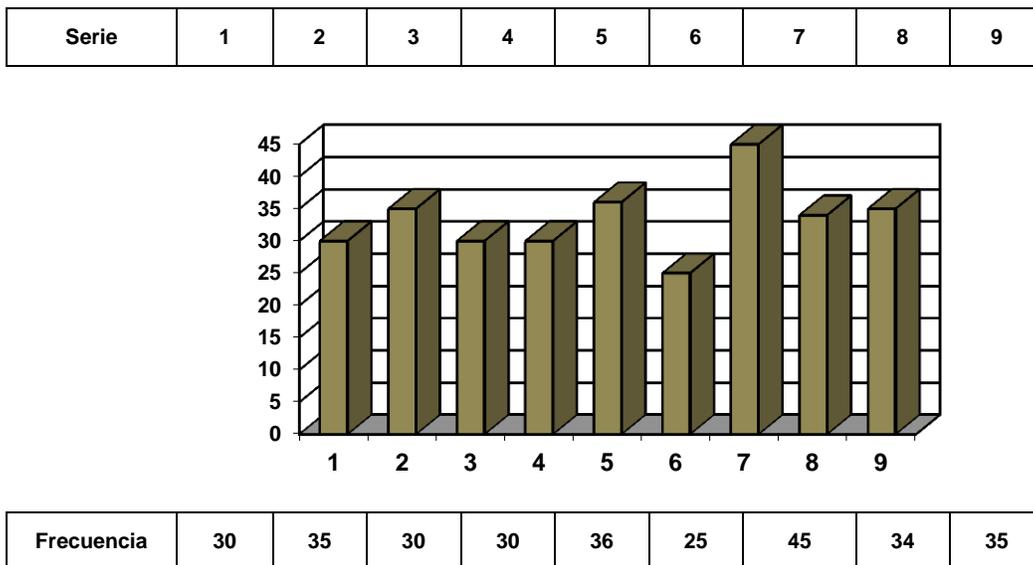


Figura 3. Distribución de frecuencias.

La distribución de las medias de las muestras tiende a distribuirse en forma normal:

Tomando muestras de 10 datos, calculando su promedio y graficando estos promedios, se tiene la distribución siguiente:

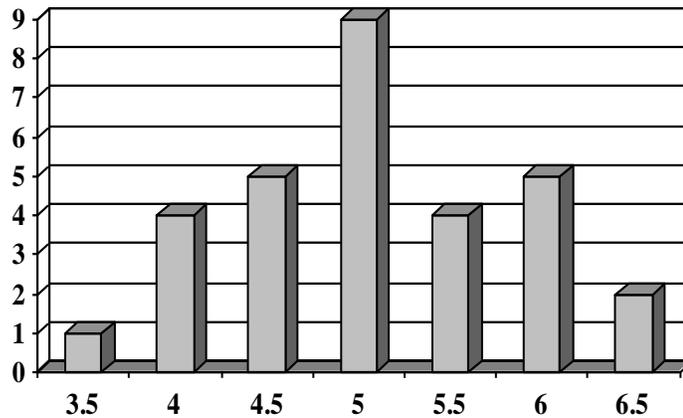


Figura 3.1. Distribución de las medias.

1.3. VARIABILIDAD EN LOS PROCESOS DE MEDICIONES.

También es necesario señalar que en los procesos de calibraciones o mediciones pueden presentarse otros tipos de variabilidad que aparece como consecuencia de incidentes no previstos, que conocemos como aleatorios. Entre estas fuentes de variabilidad pueden encontrarse: desajustes en los patrones, errores inherentes a los metrologos, variaciones no controladas en las condiciones ambientales, etc. Esta variabilidad es generalmente grande cuando se compara con el ruido de fondo y suele ser inaceptable, ver figura 4.



Figura 4. Efecto de las causas de variabilidad en las mediciones

1.4. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS DE USO EN LOS PROCESOS DE MEDICIONES:

Tomar decisiones para optimizar el resultado de los procesos de mediciones no es posible sin conocer las causas que generan la variabilidad y el impacto económico que representa.

Para esto proponemos varias herramientas estadísticas entre las que destacan en primer lugar la estimación de la incertidumbre y los balances de las mismas, pruebas de consistencia gráfica de los datos a través de los indicadores h y k de Mandel [9], pruebas de precisión a través del error normalizado En [10], análisis de varianza, el uso del criterio zeta-escore ξ [10] que involucra las incertidumbres de medida, el error medio cuadrático δ_{MSi} [22] y la relación de Birge R_B [18],[19],[20],[21].

El uso de estas herramientas estadísticas y los diseños de experimentos garantizarán la calidad de los resultados de las mediciones que se producen en los laboratorios de Metrología del CIDESI.

1.5. DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS.

El diseño estadístico de experimentos lo heredamos de Ronald Fisher cuando se enfrentó al problema de análisis de datos.

La situación primaria que se le presentó a Fisher fue que no podía dar respuesta a las preguntas o dudas que le ponían a su consideración los investigadores. Los temas todos surgían alrededor de la revisión de los datos experimentales que ellos mismos obtenían en las pruebas que realizaban. Fisher tomó en serio esta tarea y decidió un procedimiento práctico y eficiente que les invitó a seguir: antes de realizar las mediciones experimentales Fisher los asesoraba acerca de cómo debían realizar las pruebas.

De esta manera Fisher consiguió poder comparar los resultados. Así entonces, estas comparaciones fueron los primeros diseños de experimentos.

Con el pleno entendimiento de estos, paulatinamente se fueron agregando otros acomodados como los diseños factoriales y los diseños robustos.

La creación de tan variados diseños de experimentos se fundamenta en la necesidad de cubrir la gran diversidad de procesos que existen para producir muy variados productos. Las empresas y laboratorios cada vez más aplican el diseño de experimentos de manera cotidiana para optimizar el desempeño de los propios procesos ya establecidos así como para la investigación, innovación y diseño de otros nuevos productos. Este proceso es imprescindible para el mantenimiento de la

competitividad de las empresas en un mercado cada vez más globalizado, a través de la reducción de los costos de producción y la mejora de la calidad de las producciones. En este mismo sentido también trabajan los laboratorios de Metrología.

El resultado de las mediciones es, precisamente, el producto del proceso de medición que tuvo ya su origen en un diseño óptimo de experimentos. Este proceso, como cualquier otro, está sujeto a la influencia de factores que clasificamos en:

- Materiales.
- Personal.
- Equipos, instrumentos de medición.
- Ambiente.
- Métodos.
- Mediciones.

Como se representa en la figura 5.

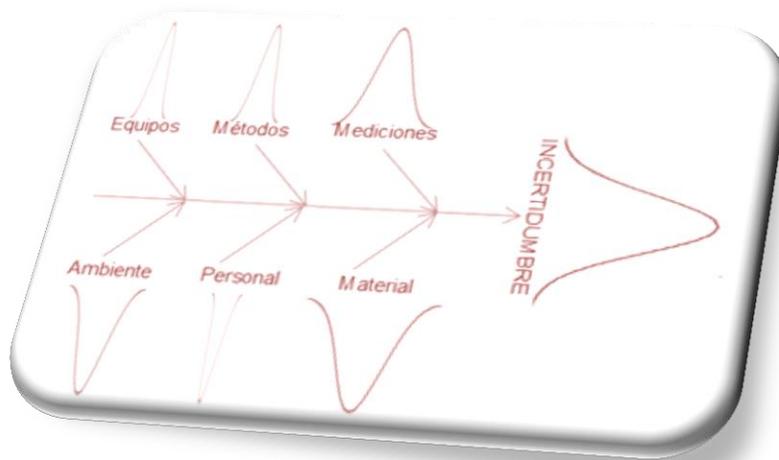


Figura 5. Factores influyentes en los procesos de medición; contribuyentes a la incertidumbre en un proceso de medición.

Nótese en la figura 5 que cada una de las subáreas o factores de influencia poseen variabilidades muy diferentes, como se sucede diariamente.

En la práctica cotidiana cualquier factor que afecta al resultado del proceso de medición, llamado contribución a la incertidumbre o como se conoce comúnmente “fuente de incertidumbre”, se puede localizar, por lo general, en alguna de estas seis ramas y en cada una de ellas se puede encontrar varios factores particulares que pueden ser los que ocasionan las fallas en la calidad o la variabilidad del resultado de las mediciones.

En este sentido los metrologos debemos evaluar para cada tipo de calibraciones-métodos la conveniencia de utilizar las herramientas estadísticas que sean idóneas para el propósito. Las herramientas son varias y con este trabajo proponemos un mínimo de ellas describiendo, en forma específica, los lineamientos de carácter técnico para evaluar los resultados obtenidos, las metodologías, criterios y recomendaciones para elegir herramientas de análisis estadístico de los resultados de las mediciones.

Los diseños de experimentos metrológicos finalmente son la planeación de un conjunto de mediciones, pruebas o corridas experimentales que se deben realizar de tal manera que, al analizar los datos que de ellas se obtengan, se puedan contestar las preguntas planteadas. Esto no significa, de ninguna manera, que de un experimento se puedan conseguir todas las preguntas y todas las respuestas, sino que es muy probable que se puedan necesitar varios experimentos secuenciales para llegar a un resultado satisfactorio.

En cualquier experimento intervienen varios tipos de variables. La variable de respuesta tiene que ver con el resultado del experimento, es decir, es la variable que se está estudiando como función de los llamados factores de influencia. Finalmente se puede concluir que los factores son las variables cuyo efecto sobre la respuesta interesa estudiar.

Para clasificar los diseños de experimentos se ha utilizado tradicionalmente el objetivo del propio experimento. Otros aspectos como son el número de niveles, las restricciones existentes y el número de corridas se utilizan para hacer una subclasificación más fina.

De acuerdo a su objetivo los diseños de experimentos se clasifican como:

- **Diseños para comparar tratamientos.** En este grupo se encuentran el diseño completamente al azar, el diseño en bloques completos al azar, diseño en cuadro latino, diseños en bloques incompletos, etc. Con estos diseños se pueden comparar diferentes métodos de medición, varios instrumentos, varios operadores, diferentes laboratorios, etc. Estos diseños no consideran la posible interacción entre los factores estudiados.
- **Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas.** En esta rama se encuentran los diseños factoriales completos y fraccionados con dos o más

niveles en cada factor. Una característica distintiva de estos arreglos es que permiten el estudio de efectos de interacción entre los factores. Los diseños factoriales tienen amplia aplicación en Metrología, por ejemplo en la determinación de incertidumbre tipo A y en los estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&r).

- **Diseños para la optimización de procesos.** En esta familia entran otra vez los diseños factoriales y algunas generalizaciones de éstos. Estos diseños tienen al menos tres niveles en cada factor lo que permite investigar efectos de tipo cuadrático, además de interacciones y efectos lineales. Con estos diseños se puede optimizar el proceso de medición, encontrando las condiciones en las que arroja los mejores resultados.
- **Diseño robusto.** Estos diseños tienen como uno de sus objetivos el hacer el producto o proceso insensible a factores no controlados o de ruido. El diseño con arreglo interno y externo fue propuesto con este objetivo, pero también se puede hacer diseño robusto utilizando un solo arreglo factorial enfocándose al análisis de las interacciones entre los factores de control y de ruido. Por ejemplo, en un laboratorio pudieran existir condiciones para mantener un instrumento patrón en las cuales algunos factores que no se pueden controlar tienen un efecto mínimo sobre el patrón. Con este tipo de experimentos se pueden investigar cuáles son esas condiciones mejores de conservación.

Por supuesto que en cada familia solo mencionamos los diseños más representativos y quedarían algunos diseños importantes no mencionados en la clasificación anterior. Los diseños anidados, por ejemplo, son bastante utilizados en los estudios R&r. Por su parte, los diseños factoriales podrían muy bien ubicarse en cualquiera de los objetivos anteriores dado que su versatilidad los hace sumamente aplicables. El objetivo general que tiene cualquier diseño experimental es estudiar el efecto de uno o varios factores sobre una o varias respuestas.

Muchas veces, coloquialmente, se le llama “el diseño” al arreglo experimental, pero la realidad es que el diseño de experimentos es mucho más que un listado de corridas experimentales. Quizás la etapa más importante es la planeación del estudio donde entra tanto el pensamiento estadístico como el conocimiento físico sobre el proceso a estudiar. Debe anticiparse desde la planeación cualquier problema que pueda surgir. Los pasos pueden agruparse y resumirse en:

1. Ubicar un proceso de Metrología susceptible de mejorarse con diseño de experimentos. Tener bien claro cuál es el objetivo del experimento, cuál el impacto esperado en caso de tener éxito.
2. Elegir la variable de respuesta (la medición de interés) y verificar que se mide de manera confiable para fines del experimento.

3. Determinar cuáles factores deben controlarse o investigarse de acuerdo a la supuesta influencia que tienen sobre la variable de respuesta de interés.
4. Seleccionar el experimento adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento. En este paso deben tomarse en cuenta las restricciones existentes, los costos, el número de repeticiones, el tipo de efectos esperados, el tiempo y recursos en general que se invertirán.
5. Realizar las corridas experimentales aleatorizando de acuerdo al plan los factores no incluidos en el estudio.
6. Determinar el modelo de análisis de varianza (ANOVA) o el modelo que mejor describa el comportamiento de los datos.
7. Verificar que los supuestos del modelo se cumplen.
8. Diagnosticar la calidad del modelo.
9. Utilizar el modelo para los fines del estudio. Por ejemplo, si se trataba de estimar componentes de incertidumbre, proceder a hacerlo, o si el objetivo era maximizar la respuesta encontrar el punto donde eso ocurre. Por ejemplo, la Guía para la Evaluación de la Incertidumbre [9], incluye incertidumbres tipo A y tipo B. La incertidumbre tipo A se calcula con medios estadísticos y la tipo B por cualquier otro medio.

Uno de los medios para calcular incertidumbre tipo B es la especificación dada por el fabricante del equipo. Sin embargo, en esto muchas veces no se toma en consideración el hecho de que dicha especificación describe a toda la población de instrumentos del fabricante y es posible que el nuestro se encuentre en una de las colas de dicha población o en el centro de la misma, en cuyo caso su incertidumbre sería un poco mayor o menor que la especificación dada. El diseño de experimentos puede ayudar a resolver este problema, evaluando experimentalmente en las condiciones del laboratorio el efecto de los factores de influencia.

1.5.1. CONSISTENCIA DE RESULTADOS.

En esta sección se definen casos aplicables a procesos de medición típicos para diversas magnitudes en el área de dimensional, donde se realizan las mediciones o calibraciones que se presumen presentan una función de probabilidad simétrica centrada “gaussiana”.

El objetivo que perseguimos en CIDESI con los controles de calidad, ya sean intra o interlaboratorios es determinar si hay consistencia entre los participantes para ofrecer resultados confiables. En este sentido se debe entender esta consistencia como la habilidad de los metrologos de los laboratorios para dar resultados en el mismo orden de exactitud, considerando las incertidumbres de las medidas.

Así entonces, evaluar la consistencia significa comprobar si todos los metrologos cumplen con la precisión deseada del método de medición y si muestran un error o desviación insignificante con relación al valor esperado de la medición, o lo que es lo mismo, un error que no afecte al resultado.

La consistencia de las mediciones es un parámetro muy discutido para el área de calibraciones en donde no hay métodos específicos para llevar a cabo cada una de ellas, al contrario del área de laboratorios de ensayos en donde se encuentra con una vasta gama de métodos normalizados, que establecen la precisión objetivo para cada método.

En muchas ocasiones la consistencia debe ser evaluada para ambos parámetros de desempeño [9]:

- **La desviación δ :** que es la diferencia entre el resultado de la medición menos el valor considerado como “verdadero” y que se usa para evaluar la existencia de un error sistemático significativo [9].
- **La precisión $\hat{\sigma}$:** dispersión esperada de los resultados de las mediciones, medida como una desviación normal [9].

Por ello se hace necesario conocer ambos parámetros para poder evaluar la consistencia de las mediciones que realizan los metrologos.

Ahora bien, si estamos conscientes que para el caso de los laboratorios de calibración se carece, en su gran mayoría, de métodos normalizados ¿Cómo determinar la precisión $\hat{\sigma}$ o desviación estándar de las mediciones?

Primeramente tenemos que aclarar que en sí la precisión corresponde a σ , es decir, la desviación estándar poblacional, que generalmente es estimada como una desviación estándar de la muestra: **s**.

Para el área de calibraciones conocer el valor de la desviación estándar de las mediciones $\hat{\sigma}$ esperada en condiciones de repetibilidad y de reproducibilidad es dificultoso. En este caso proponemos varias alternativas:

- **Usando las especificaciones de los instrumentos:** La precisión del método de calibración se especifica de manera arbitraria con el único objetivo de cumplir con un requisito de fabricación de los instrumentos. Esto es muy complicado porque la realidad es que los instrumentos que se calibran ya llevan tiempo en funcionamiento, en condiciones de uso muy diferentes, con frecuencias de uso también disímiles y, como están fuera de

nuestra alcance no podemos garantizar que no hayan sufrido daños u alteraciones de sus características. Por todo ello usar las especificaciones de fabricantes para cada tipo de instrumentos no es adecuado para los procesos de calibración y por otra parte no es costeable para los laboratorios comprar instrumentos constantemente para poder realizar los controles de la calidad.

- **Usando la experiencia:** la precisión se establece fundamentada en las opiniones de especialistas expertos en el tema. Este es un tema bastante discutido y que no permite llegar a consensos en la mayoría de los casos. Sin embargo hay experiencia acumulada en este campo, por ejemplo, como lo realiza el Centro Nacional de Metrología en la división de Metrología Dimensional en sus ensayos de aptitud técnica. Como CIDESI también tenemos la suficiente experiencia acumulada en el campo de la Metrología como para poder determinar ciertos criterios de aceptación en las diferentes magnitudes físicas. Si se opta por esta alternativa consideraremos los siguientes criterios, referidos a Metrología Dimensional:

- Para el caso de instrumentos patrones:

- ✓ El criterio de que la desviación estándar de las mediciones $\hat{\sigma}$ esperada en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad sea del orden del tercio del error máximo permisible para la clase de exactitud referida:

$$\hat{\sigma} = \frac{EMT}{3} \quad (2)$$

- Para el caso de instrumentos de medición:

- ✓ El criterio de que la desviación estándar de las mediciones $\hat{\sigma}$ esperada en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad sea del orden del tercio de la exactitud o resolución del instrumento:

$$\hat{\sigma} = \frac{Re s}{3} \quad (3)$$

- **Fundamentándose en estudios de repetibilidad (r) y reproducibilidad (R) [9]:** La dificultad es que se debe contar con métodos normalizados, que para el caso de las calibraciones no es prácticamente probable encontrarlos. Si se opta por esta alternativa la precisión $\hat{\sigma}$ esperada se estima de la siguiente forma:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\sigma_L^2 + \frac{\sigma_r^2}{n}} \quad (4)$$

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2} \quad (5)$$

Donde:

n.- Es el número de repeticiones durante las mediciones.

σ_r .- Es la precisión del método en condiciones de repetibilidad.

σ_R .- Es la precisión del método en condiciones de reproducibilidad.

σ_L .- Es la precisión del método entre laboratorios.

- **Usando los resultados de las propias calibraciones:** Para los laboratorios de calibración, que no cuentan con métodos normalizados y por consiguiente es dificultoso tener una $\hat{\sigma}$, se puede evaluar de los mismos resultados obtenidos en las calibraciones mediante técnicas de evaluación robusta. Para ello se sugiere determinar una desviación estándar robusta de las medias de los participantes que se acepta como un estimado de la desviación estándar de las calibraciones. Sin embargo, la limitante fundamental es que esta desviación estándar robusta de las medias no permitirá realizar comparaciones entre las sucesivas calibraciones que se realicen, aunque se desarrollen en condiciones de reproducibilidad, fundamentalmente porque los instrumentos serán, si bien de la misma familia, diferentes.

1.5.2. ESTABLECIMIENTO DEL VALOR X_{VA} O X_{REF} CONSIDERADO COMO “VERDADERO”.

Otro tema importante es el establecimiento del valor considerado como verdadero (entiéndase el concepto como valor convencionalmente verdadero, debido a la imposibilidad de poder conseguir el valor verdadero absoluto), valor de comparación, valor de referencia o valor asignado por consenso.

Para evaluar si los resultados de las mediciones de los participantes corresponden o son consistentes con el valor considerado como verdadero, es necesario contar con un objeto de comparación que sea, fundamentalmente, estable.

Así, el valor verdadero puede ser asignado por un método de medida superior, es decir, con mejor exactitud, precisión y menor incertidumbre, como es el caso cuando se realizan comparaciones con la técnica del error normalizado o por técnicas robustas ya sea:

- ***Por consenso de laboratorios expertos.***
- ***Por consenso de los participantes.***

Los detalles específicos para el establecimiento del valor de referencia se describen en el capítulo 3.

En la figura 6 se establece la metodología general para la realización de diseños de experimentos para comparaciones entre diferentes laboratorios, considerando que se incluirán laboratorios externos a la organización.

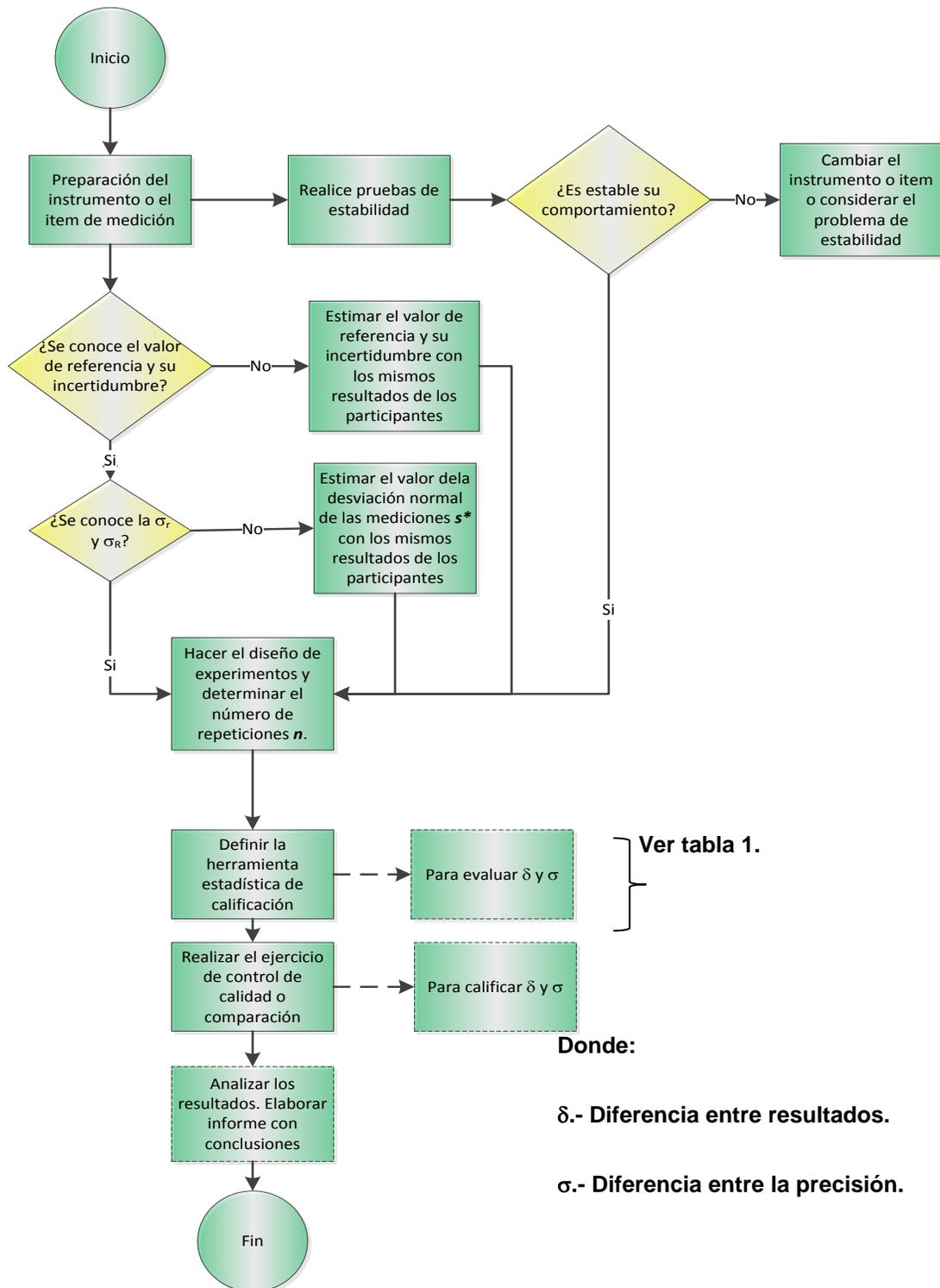


Figura 6. Diagrama general para el diseño de experimentos.

En la figura 7 se presenta el diagrama de elección de las herramientas de análisis por tipo de mediciones.

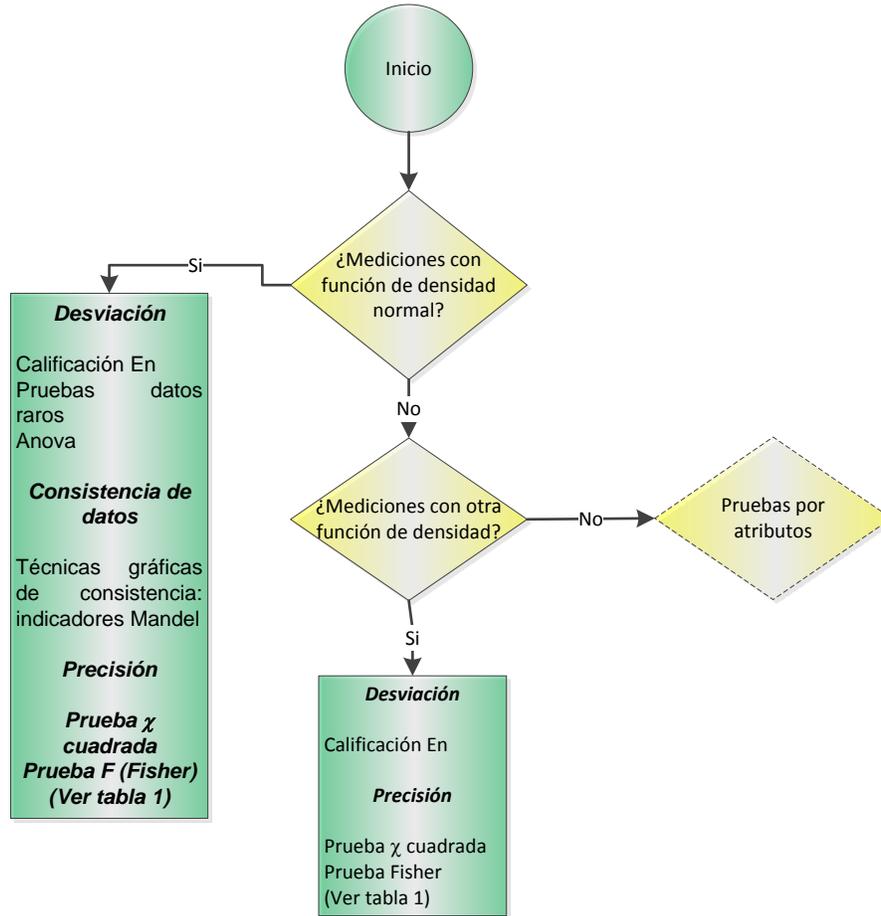


Figura 7. Diagrama de elección de las herramientas de análisis por tipo de mediciones.

Descripción:

1. Dependiendo del tipo de medición, se propone la una técnica de análisis.
2. Para una descripción más detallada de la técnica que se propone, ver tabla 1.

Otras técnicas para la evaluación de la precisión y la desviación son propuestas en este trabajo:

- El error medio cuadrático δ_{MSI}
- La relación de Birge R_B .

En la figura 8 se presenta el diagrama general para la elección de la herramienta de análisis por tipo de procesos de calibraciones o comparaciones.

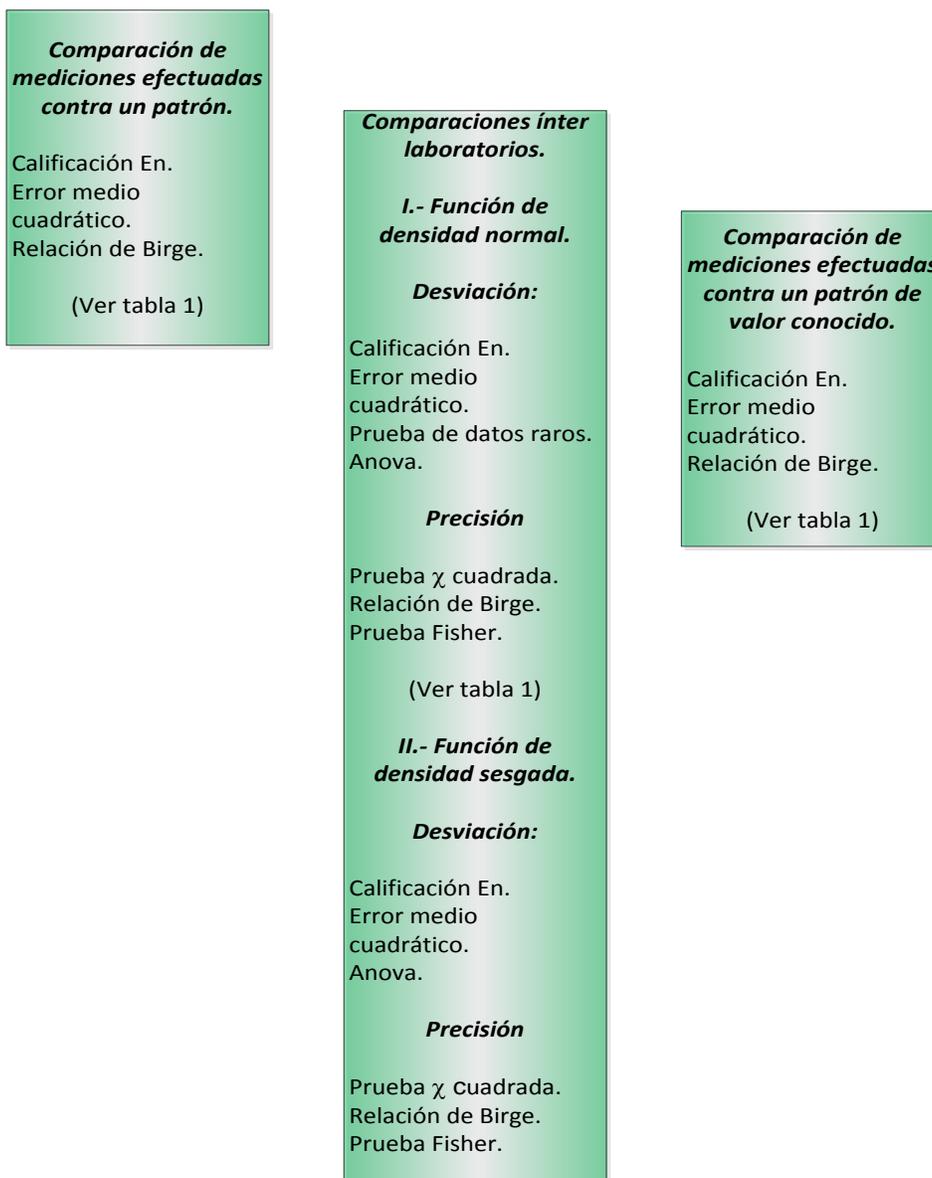


Figura 8. Diagrama general para la elección de la herramienta de análisis por tipo de calibración.

Descripción:

- 1.- Dependiendo del tipo de comparación se presenta la técnica propuesta.
- 2.- Para una descripción más detallada de la aplicación de la técnica ver tabla 1, a modo informativo.

| Tipo de medición. Características. | Diseño de experimento recomendado. | Análisis estadístico recomendado. |
|---|--|---|
| <p>Método normalizado: Se conoce σ_r. Se conoce σ_R. Se conoce el valor de comparación. La incertidumbre del valor de comparación es despreciable.</p> | <p>Número de participantes 2 o más. Mediciones de una observación o de observaciones repetidas $n > 1$. Cálculo de $\hat{\sigma}$ en función de s_r y de s_R.</p> | <p>Calificación z. Calificación ξ. Prueba χ cuadrada.</p> |
| <p>Método normalizado: Se conoce σ_r. Se conoce σ_R. Se conoce el valor de comparación. La incertidumbre del valor de comparación no es despreciable.</p> | <p>Número de participantes 2 o más. Mediciones de una observación o de observaciones repetidas $n > 1$. Cálculo de $\hat{\sigma}$ en función de s_r y de s_R.</p> | <p>Calificación En. Calificación ξ, considerando la incertidumbre del valor de comparación. Prueba χ cuadrada.</p> |
| <p>Método normalizado: Se conoce σ_r. Se conoce σ_R. Se conoce el valor de comparación. No se conoce la incertidumbre del valor de comparación.</p> | <p>Número de participantes menor de 5. Mediciones de una observación o de observaciones repetidas $n \geq 5$.</p> | <p>Prueba t-student de las combinaciones cuando: $\sigma_a = \sigma_b = \sigma_c = \dots = \sigma_n$ Considerar al valor de comparación como el promedio. Prueba Dixon. Prueba Fisher.</p> |
| <p>Métodos diferentes: Se conoce σ_i. No se conoce el valor de comparación. No se conoce la incertidumbre del valor de comparación.</p> | <p>Número de participantes igual a 2. Mediciones de una observación o de observaciones repetidas $n \geq 5$.</p> | <p>Prueba t-student de las combinaciones cuando: $\sigma_a \neq \sigma_b$ Prueba Fisher.</p> |
| <p>Método normalizado: Se conoce σ_r. Se conoce σ_R. No se conoce el valor de comparación. No se conoce la incertidumbre del valor de comparación.</p> | <p>Número de participantes menor de 5. Mediciones de una observación o de observaciones repetidas $n \geq 5$.</p> | <p>Calificación z. Calificación χ cuadrada.</p> |
| <p>Método no normalizado: Se conocen las σ_{r_s}. No se conoce el valor de comparación. No se conoce la incertidumbre del valor de comparación.</p> | <p>Número de participantes igual a 2. Mediciones de una observación o de observaciones repetidas $n \geq 5$.</p> | <p>Calificación z cuando: $\sigma_a \neq \sigma_b$ Calificación χ cuadrada.</p> |
| <p>Método normalizado: Se conocen las σ_r. Se conocen las σ_R. Se conoce el valor de comparación. La incertidumbre del valor de comparación es despreciable.</p> | <p>Número de participantes 1 o más. Mediciones de una observación o de observaciones repetidas.</p> | <p>Calificación χ cuadrada.</p> |

**Tabla 1. Criterios de elección de diseño de experimentos y herramientas de análisis.
Variable continua y función de densidad simétrica centrada.**

| Magnitud | Condición | Herramienta de análisis |
|---|---|---|
| Dimensional Masa Fuerza Presión Temperatura | Método normalizado. Cualquier función de probabilidad. Se conoce el valor del objeto de comparación y su incertidumbre. Se sabe que todos estiman la incertidumbre del resultado con el mismo modelo y es correcto. De dos participante a p participantes. | Criterio En . |
| Dimensional Masa Fuerza Presión Temperatura | Método normalizado. Cualquier función de probabilidad. No se conoce el valor del objeto de comparación y su incertidumbre. Se sabe que todos estiman la incertidumbre del resultado con el mismo modelo y es correcto. De dos participante a p participantes. | Una vez determinado el valor de referencia por técnicas robustas: Criterio En . Error medio cuadrático δ_{IRMS} . Relación de Birge R_B . |
| Dimensional Masa Fuerza Presión Temperatura | Método normalizado. Cualquier función de probabilidad. No se conoce el valor del objeto de comparación y su incertidumbre. Se sabe que todos estiman la incertidumbre del resultado con el mismo modelo y es correcto. De dos participante a p participantes. | Calificación ξ . |

Tabla 2. Criterios de elección de herramienta de análisis para comparaciones de laboratorios.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA PRUEBAS DE CONSISTENCIA EN LA IDENTIFICACIÓN DE DATOS RAROS.

2. GENERALIDADES.

Los datos raros merecen siempre un análisis estadístico para conocer la fuente que los provoca y así eliminar la aparición de los mismos y su no deseada concurrencia.

Son bastante frecuentes en las áreas de mediciones. Las normas intentan reducir la aparición de los mismos estableciendo diferentes controles que deben de realizarse durante las tomas de lecturas. Los laboratorios realizamos diferentes actividades para evitar este tipo de errores. Podemos citar por ejemplo, las supervisiones que se realicen por personal experto durante las tomas de datos, la elaboración de herramientas de transmisión y captura de datos a través de configuraciones en softwares gracias a la cada vez más difundida utilización de la electrónica en los instrumentos de medición. Sin embargo, no todas las mediciones son automatizadas e incluso cuando lo son, también un dato raro puede ser producido por el propio instrumento debido a errores imprevistos o aleatorios.

Por ello, normalmente se piensa que son productos de errores aleatorios imputados indistintamente al metrólogo o al instrumento bajo calibración según sea la interpretación que se les dé o se les pueda dar. Lo cierto es que en muchas ocasiones no conocemos a ciencia cierta qué los provoca.

Cuando se realizan análisis estadísticos inductivos a partir de muestras aleatorias, es necesario saber si entre los resultados obtenidos de los experimentos existen datos raros debidos a errores fortuitos que sucedieron y que no deben ser considerados en los estudios. Estas técnicas pueden ser usadas para la evaluación de datos obtenidos en pruebas inter e intra laboratorios o en los controles externos e internos de la calidad.

Se pueden usar varias técnicas para estudiar la consistencia de los resultados de las pruebas procedentes de varios laboratorios:

- la técnica gráfica, analizando los valores de los estadísticos k y h de Mandel [9], o
- el uso de ambas técnicas: la gráfica y la numérica. La gráfica se expuso en el primer inciso y la numérica utilizando pruebas de Cochran y Grubbs [9], sin ser exclusivas.

Para esto proponemos dos criterios:

- Sí existe conciencia y evidencia de que hubo un error en el experimento: el hecho es simple y se propone descartar el dato y sustituirlo por otro.
- Sí no existe conciencia y evidencia de que hubo un error en el experimento: se propone aplicar una técnica de consistencia estadística para evaluar la posibilidad de eliminar el dato raro o conservarlo para su estudio.

2.1. PRUEBAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE DATOS RATOS.

Para esta eliminación de posibles datos raros existen diferentes pruebas, llamadas de consistencia, que pueden ser aplicadas tales como:

2.1.1. MODELOS MATEMÁTICOS PARA PRUEBAS DE CONSISTENCIA UTILIZANDO LOS INDICADORES MANDEL.

Para cada laboratorio participante y por cada nivel [9], se debe calcular el indicador de consistencia h_{ij} , que muestra cómo el promedio de los resultados de un laboratorio (o metrólogo) en particular se comporta con el promedio del resto de los metrólogos (laboratorios) y el indicador de consistencia k_{ij} , que indica cómo la variabilidad intra laboratorio de un metrólogo (laboratorio) particular, bajo condiciones de repetibilidad, compara con el resto de los metrólogos (laboratorios) combinados; es decir, evalúa la consistencia de la precisión de cada laboratorio con relación a la esperada.

Para este análisis hay que calcular primeramente la media de cada participante por cada nivel:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

Donde:

- x_i Son los resultados de las mediciones de cada participante.
- n Es el número de repeticiones.

Posteriormente se debe calcular la desviación estándar de cada participante por nivel:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

Donde:

\bar{x} Es la media.

x_i Son los resultados de las mediciones de cada participante.

Calcular la medida de las medias del nivel:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^p \bar{x}_i}{p} \quad (8)$$

Donde:

p Es el número de participantes.

Se tiene que calcular ahora el coeficiente h_j de cada participante por nivel:

$$h_j = \frac{d}{s_x} \quad (9)$$

Y la desviación estándar es:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p d_i^2}{p-1}} \quad (10)$$

Donde:

d_i Desviación del promedio de cada laboratorio i respecto al promedio global.

s_x Desviación típica de los promedios de todos los laboratorios.

p Número de laboratorios participantes.

Conociendo que:

$$d_i = (\bar{x}_i - \bar{x}) \quad (11)$$

Finalmente:

$$h_{ij} = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (x_i - \bar{x})^2}} \quad (12)$$

Este valor h_{ij} hay que compararlo con un valor estadístico al cual llamamos valor crítico y se calcula por la ecuación:

$$h_{crítico} = \frac{(p-1)t}{\sqrt{p(t^2 + p-2)}} \quad (13)$$

Donde:

t es la t de student con $p-2$ grados de libertad, al nivel de significación de 0,5%.

Por su parte el indicador k_{ij} , que como ya se ha dicho indica cómo la variabilidad intra laboratorio de un participante particular, bajo condiciones de repetibilidad, compara con el resto de los laboratorios, está definido por:

$$k = \frac{s_i}{s_r} \quad (14)$$

Donde:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{y} \quad (15)$$

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p s_i^2}{p}} \quad (16)$$

Donde:

s_i^2 Desviación típica de los resultados de cada participante.

s_r Desviación típica de la repetibilidad.

n Número de réplicas.

Así, el valor de k es:

$$k_{ij} = \frac{s_i \sqrt{p}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p s_i^2}} \quad (17)$$

Donde:

s_i desviación típica de los resultados de cada laboratorio particular;

El valor de comparación $k_{crítico}$ se calcula según:

$$k_{crítico} = \sqrt{\frac{p}{1 + \frac{p-1}{F}}} \quad (18)$$

Donde:

F Es el valor de la distribución Fisher-Snedecor con (n-1) y (p-1) grados de libertad al nivel de significación de 0,5%.

Concluyendo:

| | |
|-----|--|
| h | Estadístico de consistencia entre participantes: Compara el promedio de las réplicas con el valor asignado (promedio global). A mayor valor absoluto de h_{ij} ($/h_{ij}$), menor consistencia entre los resultados de un laboratorio particular respecto al resto de los laboratorios. |
| k | Estadístico de consistencia intralaboratorio: Compara la desviación típica de las réplicas con la desviación típica combinada o de repetibilidad. Si $k = 1$, la variabilidad de ese laboratorio es igual a la del resto. Si $k > 1$ su variabilidad es mayor y si $k < 1$ su variabilidad es menor. Valores altos de k representan variabilidad intralaboratorio, valores muy pequeños de k pueden indicar escasa sensibilidad en la medición u otros problemas asociados a ellas. |

2.1.2. IDENTIFICACIÓN DE DATOS RAROS POR TÉCNICAS NUMÉRICAS.

Según se establece en la norma NMX-CH-5725 [9] se recomienda la prueba de Cochran para examinar la consistencia intralaboratorio para el análisis de la dispersión y la prueba de Grubbs para examinar la consistencia (una cola valor máximo) interlaboratorio para el análisis de

desviación (dos colas). La prueba de Grubbs también se puede usar como test de consistencia de los resultados medidos en un laboratorio usando materiales idénticos.

El estadístico C de Cochran se define como:

$$C = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p s_i^2} \quad (19)$$

Donde:

s_{\max}^2 Es la desviación típica mayor del conjunto de las desviaciones típicas determinadas.

La técnica de Cochran es una prueba de valores aberrantes de una cola porque examina solamente el valor más alto de una serie de desviaciones típicas.

Para los valores críticos de Cochran ver tabla en el anexo C.

Por su parte para el análisis por la prueba de Grubbs, los datos a ser analizados deberán ser ordenados en orden ascendente, que es, para una serie de p valores $x_j = \{j = 1, 2, \dots, k\}$, donde x_i es el menor y x_k el mayor. Para examinar la significación del valor mayor, es estadístico de Grubbs se calcula por:

$$G = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \quad (20)$$

o lo que es lo mismo

$$G = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (x_i - \bar{x})^2}} \quad (20.1)$$

Para examinar el valor más pequeño:

$$G_1 = \frac{x - x_1}{s} \quad (20.2)$$

Para examinar los dos valores mayores:

$$G_{k-1,k} = \frac{s_{k-1,k}^2}{s_0^2} \quad (20.3)$$

Donde:

$$\left. \begin{aligned} s_0^2 &= \sum_{j=1}^k (x_j - \bar{x})^2 \\ s_{k-1,k}^2 &= \sum_{j=1}^{k-2} (x_j - \bar{x}_{k-1,k})^2 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\bar{x}_{k-1,k} = \frac{1}{k-2} \sum_{j=1}^{k-2} x_j$$

De modo similar, para examinar los dos valores más pequeños:

$$G_{1,2} = \frac{s_{1,2}^2}{s_0^2} \quad (22)$$

Donde:

$$\left. \begin{aligned} s_{1,2}^2 &= \sum_{j=3}^k (x_j - \bar{x}_{1,2})^2 \\ \bar{x}_{1,2} &= \frac{1}{k-2} \sum_{j=3}^k x_j \end{aligned} \right\} \quad (22.1)$$

Cuando la prueba de Grubbs se aplica a las medias para comprobar la consistencia interlaboratorio: $x = \bar{y}$ y $k = p$, mientras que cuando se aplica a los datos originales (para determinar la consistencia de n resultados de un laboratorio): $x = y$ y $k = n$

Para los valores críticos de Grubbs ver tabla en el anexo D.

Normalmente, los valores críticos con un nivel de significación $\alpha = 1\%$ y $\alpha = 5\%$ se usan como criterios para valores aberrantes y extraños, respectivamente, es decir:

- a) Si el estadístico es mayor que el valor crítico del 1%, el valor de comparación es considerado un valor aberrante.
- b) Si el estadístico es mayor que el valor crítico del 5% pero menor que el valor crítico del 1%, el valor de comparación es considerado un valor raro.
- c) Si el estadístico es menor o igual que el valor crítico del 5%, el valor de comparación se acepta como correcto.

Si como consecuencia de las pruebas de consistencia se encuentra un valor aberrante o extraño, el laboratorio que produce ese valor aberrante o extraño deberá ser consultado para comprobar la posibilidad de errores, por ejemplo, tipográficos, muestra equivocada, calibración impropia, un error en la ejecución del experimento, etc. Si la explicación del error técnico es tal que hace imposible reemplazar el valor sospechoso, el aberrante será rechazado (descartado) del estudio al menos que haya una buena razón para mantenerlo, mientras que un valor extraño puede ser retenido en el estudio.

Si varios valores extremos o aberrantes son encontrados utilizando con el estadístico k o con la prueba de Cochran a diferentes niveles de prueba dentro de un laboratorio, esto puede ser una fuerte indicación de que la varianza intralaboratorio es excepcionalmente alta (puede ser debido a falta de familiarización por el método, diferentes operadores, equipamiento inadecuado para las mediciones, pobre mantenimiento, o descuidada ejecución), y el total de los datos de este laboratorio será rechazado.

Si varios valores extraños o aberrantes son encontrados con el estadístico h o la prueba de Grubbs a diferentes niveles dentro de un laboratorio [9], esto puede ser una fuerte indicación de que el sesgo del laboratorio es excepcionalmente alto (puede ser debido a un error sistemático alto en calibración, o errores al computar los resultados). En este caso los datos pueden ser corregidos después de rehacer la calibración o computación. En los demás casos todos los datos de este laboratorio serán también rechazados.

Después de rechazar los aberrantes la prueba de consistencia puede ser repetida pero la aplicación repetida de los tests de consistencia debe ser usada con gran precaución, porque este proceso repetido a veces conduce a excesivos rechazos. Además hay que tener en cuenta que un rechazo de más de un 20 % del número original de participantes sin una explicación se considera excesivo.

2.1.3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE RÉPLICAS, n .

El número de réplicas o repeticiones influye en la elección de la herramienta de análisis de datos para descartar los valores aberrantes o raros. Así podemos decir:

- El número de réplicas n puede ser igual a uno o mayor si el proceso de medición tiene una función de probabilidad normal, y no se pretende evaluar el cumplimiento de una precisión esperada.
- El número de réplicas n podrá estar entre 3 y 5 si el proceso de medición puede presentar una función de densidad sesgada. La comparación puede realizarse utilizando las medias de los resultados de cada participante. Esto permite utilizar razonablemente las técnicas de análisis que consideran una función de probabilidad normal.

CAPÍTULO 3. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PROPUESTAS PARA ANÁLISIS DE DATOS O RESULTADOS DE LAS MEDICIONES.

3. GENERALIDADES.

Esa frecuente escuchar que los laboratorios tienen que demostrar la validez de sus datos o resultados de las mediciones a través de herramientas estadísticas. Esto es muy buena práctica de laboratorio. Sin embargo es pertinente recordar que los laboratorios de calibración estimamos la incertidumbre de cada una de las mediciones que realizamos. Esta estimación de incertidumbre [9] es una herramienta de control de la calidad de los datos.

La estimación de la incertidumbre permite un análisis detallado de cada una de las variables de influencia en cada medición en particular. Utilizando bien el tema de incertidumbre y representando la misma en forma de presupuestos con balances de incertidumbre el laboratorio puede introducir mejoras en los procesos de medición.

3.1. INCERTIDUMBRE DE MEDIDA.

En el desarrollo del concepto de incertidumbre se han modificado los principios en los que se fundamentaba el origen, el tratamiento y la aplicación de las herramientas matemáticas y estadísticas que permiten su empleo en Metrología.

En principio se creía que el concepto de error era, en cierto grado, determinista, usándose la definición del error absoluto “ ε ” [12] como el que se obtenía como la diferencia entre el resultado de una medición y el valor verdadero o convencionalmente verdadero. Por otro lado, el error relativo “ e ” [12] se podía expresar matemáticamente como el cociente entre el error absoluto y el mencionado valor verdadero.

Surgió el problema de la caracterización de lo que se llamó valor verdadero.

La realidad indica lo imposible que es alcanzar la determinación exacta de ese valor, fundamentalmente debido a las limitaciones propias de todo proceso de medición, avaladas absolutamente por **el principio de incertidumbre de Heisenberg** (galardonado con el Premio Nobel de Física en 1932) **el que afirma que las variables dinámicas** como la posición, por ejemplo, **se definen de manera estratégica**, esto es, **en términos relativos al procedimiento de medición que se usa en su determinación**. Así, bajo estas consideraciones, la posición se definirá con respecto a un sistema de referencia determinado, definiendo el instrumento de medida empleado y el modo en que tal instrumento se usa, por ejemplo, la medición de la distancia que hay de un punto a la referencia indicada utilizando una regla.

Otro ejemplo puede ser el número π . Debido a que es un número irracional, el uso del mismo está siempre condicionado a la utilización de un valor aproximado π_n [4]. Esto es debido a que el valor verdadero o exacto no es alcanzable si no es de manera asintótica, es decir, una curva a la cual se acerca indefinidamente otra, sin llegar jamás a coincidir. Por tanto, debe aceptarse la existencia de un cierto $\Delta\pi = \pi - \pi_n$, que puede cuantificarse como la diferencia entre ese valor exacto de π y el aproximado π_n , que se caracteriza por el número n de cifras decimales que se requieran utilizar.

En la figura 9 se presenta la evolución del conocimiento de las cifras significativas del número π en un período de 2 500 años.

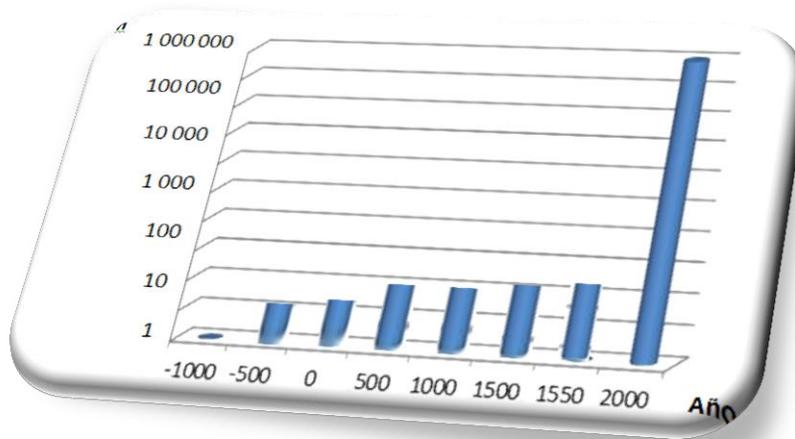


Figura 9. Evolución del número de decimales del número π .

Surge entonces el primer ejemplo de la imposibilidad de conocer el valor verdadero de una magnitud en cuestión. Sabiamente se incluye en el vocabulario metrológico el concepto de valor convencionalmente verdadero.

Por su parte el nacimiento de la teoría de errores se da gracias a la necesidad de comparar con exactitud los datos observados en la práctica contra los que las teorías preveían. Daniel Bernoulli (1700 – 1782) fue el primero en facilitar una solución al problema de estimar una cantidad desconocida a partir de un conjunto de mediciones de su propio valor, las cuales, debido al error experimental que se generaba, presentaba cierta variabilidad, precisando de esta manera los principios del cálculo de probabilidades, que había sido fundado científicamente por Jacques Bernoulli (1654 – 1705)[4].

Por su parte Tomás Bayes (1702 – 1761) abordó el problema de las causas a través de los efectos observados. En su trabajo expone el teorema que lleva su nombre y que fundamenta la estadística bayesiana, de uso generalizado para calcular la probabilidad de la validez de una propuesta considerando como bases la estimación de la probabilidad previa[4].

Fue el Marqués de Laplace (Pierre Simon, 1749 – 1827) quien relacionó todas estas ideas y propuso la primera teoría general de la probabilidad, presentó la primera tesis manifiesta de probabilidad, desarrolló la ley normal como modelo para representar la variabilidad de los errores de medida y enunció el primer modelo interpretativo estadístico. Laplace descubrió que si el número de mediciones es lo suficientemente grande, no es necesario conocer la distribución de los errores, tal y como había declarado Lagrange[4].

Por su parte Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855) realizó su contribución en la estimación de modelos estadísticos, experimentando la teoría de los errores, lo que le llevó al estudio de la distribución de probabilidad de errores y con ello a la distribución normal[4].

De forma cotidiana se venía considerando la existencia de dos tipos de errores disímiles en función de su origen: **los errores sistemáticos y los aleatorios**.

Los errores sistemáticos se caracterizaban por lo constante de las desviaciones que podían experimentar las mediciones efectuadas en condiciones de repetibilidad, mientras que los aleatorios se muestran a través de impredecibles desviaciones de las mediciones, aun cuando también las mediciones se realicen en condiciones de repetibilidad. Otra característica es que los errores sistemáticos pueden conservar sensiblemente tanto su valor absoluto como su signo, mientras que los aleatorios no.

Los errores aleatorios se proponía fueran estimados de la media de una serie de medidas. Los aleatorios debido fundamentalmente a que obedecen a muchos fenómenos de la naturaleza, admitían ser calculados mediante el establecimiento de un nivel de confianza α , a partir de la repetición de una serie de mediciones. Mientras de los sistemáticos no admiten tratamiento estadístico al considerar que su naturaleza es radicalmente distinta a la de los aleatorios, ya que al no deberse al azar, su causa es determinada.

No obstante a ello la problemática continuaba debido a que una vez determinados los dos tipos de errores hay que proceder a obtener un valor del error.

Hace un tiempo no había una consideración establecida que facilitara la forma de llevar a cabo la obtención del error total, existiendo para ello la realización de la suma simple de ambas

componentes de error, la ponderación de las mismas o la obtención del mismo a través de la suma cuadrática de ambas componentes, indistintamente.

Al identificarse el concepto de error a través de los mencionados intervalos de confianza, la incertidumbre se empezó a identificar con un intervalo de confianza debido a la necesidad de acotar el error resultante obteniendo un intervalo de seguridad que comprendiese al valor verdadero con un cierto nivel de confianza. Considerando el teorema del límite central, las medias x_i de un conjunto de p series de mediciones experimentales q_{ki} se distribuyen de acuerdo a una normal de media μ y desviación típica σ .

Si se define la variable z como:

$$z = \frac{x - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \sqrt{n} \quad (23)$$

Dicha variable se distribuirá según una normal $N(0,1)$, por lo que, empleando los valores de su función de distribución, la probabilidad de que z esté dentro del intervalo $z \pm k$, resulta igual a $1 - \alpha$

$$P[-k \leq z \leq k] = 1 - \alpha \quad (24)$$

Sustituyendo z :

$$P\left[-k \leq \frac{(x - \mu)}{\sigma} \sqrt{n} \leq k\right] = 1 - \alpha \quad (25)$$

ó

$$P\left[x - k \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq x + k \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] = 1 - \alpha \quad (26)$$

Definiendo el intervalo:

$$x \pm k \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (27)$$

como aquel que contiene al valor verdadero x con un nivel de confianza de $1 - \alpha$.

Para el caso de que no conozcamos los valores de la media y de la desviación estándar de la población original, éstos deberán ser primeramente estimados a través de la media de los valores experimentales y la desviación típica estimada. Así entonces, la nueva variable t :

$$t = \frac{x - \mu}{\frac{s_q}{\sqrt{n}}} = \frac{(x - \mu)}{s_q} \sqrt{n} \quad (28)$$

se distribuirá de acuerdo con una t de student, verificándose el intervalo:

$$x \pm t \frac{s_q}{\sqrt{n}} \quad (29)$$

Como aquel que contiene al valor verdadero x con un nivel de confianza de $1-\alpha$.

ó

$$P \left[x - t \frac{s_q}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq x + k \frac{s_q}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha \quad (30)$$

De donde se puede apreciar que t depende del nivel de confianza $1-\alpha$ y de los grados de libertad n .

La problemática de este tratamiento reside en la necesidad de aceptar una función de distribución concreta que identifique la población de resultados de medida. Claro está que al ser imprescindible identificar el error total y maximizar este para lograr un nivel de confianza apropiado, el uso de los intervalos de confianza creaba la necesidad de admitir la hipótesis de que todos los resultados de la medida respondían a la ley de distribución normal.

El paso siguiente fue el de disminuir el uso de los términos de error y análisis de error, dando prioridad al uso del término de incertidumbre, aunque persistió y aun sucede, un nivel de confusión entre la incertidumbre, el valor verdadero y el error.

Paralelamente la globalización de la economía, y la progresiva importancia que cobraban los diversos organismos internacionales dentro del campo de la Metrología, la Acreditación y la Normalización, presumió el desarrollo de los conceptos de calibración, trazabilidad metrológica, diseminación de las unidades de medida, entre otros, de forma tal que se garantizase un orden metrológico coherente y perfectamente definido, con la posibilidad de referir la exactitud de cada instrumento a través de cadenas ininterrumpidas de comparaciones jerarquizadas hasta los

patrones de más alto nivel, que reproducen las unidades del Sistema Internacional de unidades de medida.

Para continuar con los trabajos del tema de la incertidumbre de medida se trató de conferir una correcta coherencia a la ejecución de las intercomparaciones [10] entre los distintos laboratorios, pero se tropezó de nuevo con el problema que suponía que cada uno de los participantes en ellas usase discernimientos disímiles a la hora de identificar, evaluar y expresar el valor de las incertidumbres de sus mediciones.

Para garantizar esto el Comité Internacional de Pesas y Medidas consideró adecuado solicitar al Buró Internacional de Pesas y Medidas que trataran este tema junto a los laboratorios de Metrología.

De estos trabajos salió a la luz la recomendación GUM [6] por sus siglas en inglés de la frase “Guide to the expression of Uncertainty in Measurement hoy adoptada en México como la NMX-CH-140 [7], que destaca la naturaleza única de cualquier tipo de error, agrupando las componentes de la incertidumbre del resultado de una medida en dos categorías, según la forma en que se estime su valor numérico:

- Tipo A: las que se evalúan por métodos estadísticos.
- Tipo B: las que se evalúan por otros métodos.

Esta nueva categorización de incertidumbres es parcial, ya que una misma componente de la incertidumbre puede, por momentos, evaluarse a través de métodos estadísticos y por tanto considerarse de tipo A y en otras ocasiones estimarse o evaluarse por otros métodos con lo que se considerará de tipo B.

También se propone caracterizar las incertidumbres de tipo A por medio de las varianzas estimadas s_{qi}^2 o a través de las desviaciones típicas estimadas s_{qi} ; mientras que para las componentes tipo B plantea el uso de varianzas estimadas u_i^2 , tratándose como aproximaciones de varianzas, de existencia admitida, o como desviaciones típicas u_i

Respecto a la incertidumbre combinada propone el empleo del método de la ley de propagación de varianzas, debiendo expresarse tanto esta como sus componentes como desviaciones típicas. Cuando se necesite expandir la incertidumbre, se exige la necesidad de indicar el factor de cobertura utilizado.

Queda fuera ya el uso de los intervalos de confianza para cuantificar la incertidumbre, dando paso a la difusión del uso de desviaciones típicas. Este cambio es ampliamente justificado debido a que:

- La determinación de un intervalo de confianza presupone la aceptación de una función de distribución.
- La aplicación de la ley de propagación de varianzas permite obtener la incertidumbre de mediciones indirectas de una forma muy simple e independiente del carácter poblacional de los resultados.

Efectivamente si tenemos en cuenta una magnitud de salida y como función de un conjunto de n magnitudes de entrada x_i , entonces:

$$y = f(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) \quad (31)$$

evaluadas todas de una serie de n mediciones experimentales q_{ik} , cada una con su función de distribución respectiva, el desarrollo en serie de Taylor de primer orden de la función f en torno a las esperanzas matemáticas de las x_i (medias):

$$E(x_i) = \mu_{x_i} \quad (32)$$

proporciona para pequeñas variaciones de y alrededor de su esperanza matemática μ_y , en función de las pequeñas variaciones de x_i alrededor de μ_{x_i} la expresión:

$$y - \mu_y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} (x_i - \mu_{x_i}) \quad (33)$$

Debido a que se puede admitir que:

$$\mu_y = f(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (34)$$

Si expresamos el cuadrado de la diferencia, obtenemos como resultado:

$$\begin{aligned} (y - \mu_y)^2 &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} (x_i - \mu_{x_i}) \right)^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (x_i - \mu_{x_i})^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} (x_i - \mu_{x_i})(x_j - \mu_{x_j}) \end{aligned} \quad (35)$$

Considerando sus esperanzas matemáticas:

$$E[(y - \mu_y)^2] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 E[(x_i - \mu_{x_i})^2] + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} E[(x_i - \mu_{x_i})(x_j - \mu_{x_j})] \quad (36)$$

Conociendo que la esperanza del momento centrado de la media es la varianza y la de los momentos cruzados es la covarianza, resultará:

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{x_{ij}} \quad (37)$$

Esta expresión, como lo indica la NMX-CH-140 [7], se puede poner como función del coeficiente de correlación, relacionado con la covarianza a través de la expresión:

$$\rho_{x_{ij}} = \frac{\sigma_{x_{ij}}}{\sigma_{x_i} \sigma_{x_j}} \quad (38)$$

Finalmente:

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j} \rho_{x_{ij}} \quad (39)$$

La incertidumbre combinada para magnitudes de entrada no correlacionadas, independientes, se obtiene combinado apropiadamente las incertidumbres estándar de las estimaciones de las magnitudes de entrada. La incertidumbre estándar combinada se denota por $u_c(y)$

La incertidumbre estándar combinada se denota por $u_c(y)$ es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada la cual está dada por:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (40)$$

La incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ es una desviación estándar estimada que caracteriza la dispersión de los datos que pueden atribuirse razonablemente al mensurando.

Cuando la linealidad de la función llega a ser significativa deberán contemplarse términos de orden superior en la expansión de la serie Taylor para $u_c^2(y)$.

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right]^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2} u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (41)$$

3.2. CRITERIO DEL ERROR NORMALIZADO, En .

Cuando en una comparación los participantes reportan el resultado con su respectiva incertidumbre asociada y se conoce el valor verdadero de la magnitud que se mide por medios que no involucran los resultados de la misma comparación, casi siempre por métodos superiores, se puede usar el criterio del número normalizado En [10]. Este es un concepto importante para los laboratorios de calibración.

El criterio del En , conocido también como el índice de compatibilidad, es muy buena técnica de evaluación de resultados en comparaciones porque analiza tanto los errores como las incertidumbres, detalle este importante para los laboratorios de calibración que deben reportar, siempre, los errores acompañados de la incertidumbre expandida.

Los laboratorios de calibración parten del criterio que cuando se reporta el resultado de una medición de una cantidad física (magnitud) es obligatorio dar un valor cuantitativo de la calidad de dicho resultado. Sin este valor, no es posible realizar una comparación entre éstas y/o el valor de referencia, por lo que tenemos claramente definido, implementado y entendido el procedimiento para caracterizar la calidad del resultado de medición, a través de las estimaciones coherentes de las incertidumbres de medida.

En ese entendido si una magnitud física se mide con dos o más métodos, por distintos observadores o en tiempos distintos, es posible, y muy probable, que los resultados no sean los mismos. En este caso se dice que existe una discrepancia en los resultados, esto es natural y propio de toda medición. Sin embargo, lo importante es saber si la discrepancia es significativa o no.

El En , básicamente, permite conocer las diferencias de los valores de las lecturas reportadas por los participantes con respecto a las lecturas de la referencia, considerando las incertidumbres de ambos.

Su sustento estadístico proviene de la teoría o hipótesis de medias iguales y varianzas iguales. Por tanto para aplicarlo se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se está seguro de que todos los participantes calculan aceptablemente la incertidumbre del resultado de la medición.
- Los errores de los laboratorios respecto al valor de referencia siguen una curva normal.
- Todos los participantes usan el mismo modelo de expresión de incertidumbre o semejante.
- Los participantes asocian el mismo nivel de confianza y por tanto las incertidumbres de los errores, del valor de referencia y de los valores de referencia están expresados con el mismo factor de cobertura, usualmente igual a 2.
- El punto anterior hace suponer que la desviación estándar de la función de distribución de probabilidad de errores es la mitad del denominador del error normalizado
- Se conoce la incertidumbre del valor de referencia.
- El valor de referencia sea determinado por técnicas de medición superiores, que involucren patrones de mayor exactitud y con incertidumbres acordes a esas técnicas de medición.
- La correlación entre los valores de los laboratorios participantes es nula. Frecuentemente esta hipótesis no se cumple, especialmente cuando los instrumentos de medida son calibrados con el mismo patrón.

Esto quiere decir que se está seguro de las incertidumbres reportadas. En caso contrario, si se tiene duda de la veracidad de la estimación de las incertidumbres de los resultados, esta técnica puede llevar a conclusiones erróneas.

El criterio del **En** no es sensible al número de participantes y como su resultado está influenciado por la inversa de la incertidumbre expandida del laboratorio participante, si las incertidumbres no son estimadas de manera coherente puede existir un sesgo en su interpretación, asunto este que muchos laboratorios ya han entendido y en los ejercicios de intercomparaciones en que se usa esta técnica intentan presentar resultados con incertidumbres expandidas muy grandes para garantizar que el denominador de la expresión sea suficientemente grande para que el **En** sea menor a la unidad.

El error normalizado puede usarse también cuando uno hay una referencia clara, es decir, cuando se calcula un valor de referencia y su incertidumbre por consenso de los laboratorios participantes.

Cuando hay una referencia

Cuando la referencia es un valor asignado

$$E_n = \frac{|x_{lab} - X_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad \text{ó} \quad E_n = \frac{|x_{lab} - X_{VA}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{XVA}^2}} \quad (42)$$

Donde:

E_n .- Criterio del error normalizado.

x_{lab} .- Valor de informado por el laboratorio participante.

X_{ref} .- Valor de referencia.

U_{lab}^2 .- Incertidumbre del valor reportado por el participante.

U_{ref}^2 .- Incertidumbre del valor de referencia.

X_{VA} Valor asignado por consenso a través de técnicas robustas.

U_{lab}^2 .- Incertidumbre estándar de los laboratorios.

U_{XVA}^2 = Incertidumbre del valor asignado

Por su parte el valor asignado por consenso a través de técnicas robustas se calcula por la ecuación siguiente:

$$X_{VA} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{u_{x_i}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_{x_i}^2} \right)} \quad (43)$$

Donde:

$x_i = x_{lab}$.-Valor de informado por el laboratorio participante.

$u_{x_i}^2$.- Incertidumbre del valor reportado por el participante.

Mientras que la incertidumbre del valor asignado se calcula a través de la expresión:

$$u_{XVA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{x_i}^2}}} \quad (44)$$

El criterio de aceptación es:

$|E_n| \leq 1$ Satisfactoria la comparación.

$|E_n| > 1$ El resultado es no satisfactorio.

3.3. CALIFICACIÓN ξ o z SCORE.

El criterio o calificación ξ [10], al igual que el criterio de **En**, se puede aplicar en las comparaciones de laboratorios o controles de calidad cuando los participantes reportan el resultado con la incertidumbre asociada y el valor de referencia se determina por métodos que no involucren los mismos resultados reportados por los participantes.

Esta calificación es recomendada solamente si se está seguro de que todos los participantes calculan aceptablemente la incertidumbre del resultado de la medición, usan el mismo modelo de expresión y conocen la incertidumbre del patrón.

En los laboratorios de calibración acreditados no significa mayor complicación poder utilizar esta técnica debido a que trabajamos con procedimientos técnicos en los que se incluye, por magnitudes y submagnitudes, los modelos matemáticos y la forma detallada de la expresión de la incertidumbre.

En caso contrario si se tienen dudas de la veracidad de la estimación de la incertidumbre de los resultados esta técnica puede llevar a conclusiones erróneas.

$$\xi = \frac{|x_{lab} - X_{ref}|}{\sqrt{u_{lab}^2 + u_{ref}^2}} \quad (45)$$

Donde:

ξ .- Calificación ξ .

x_{lab} .- Valor de informado por el laboratorio.

X_{ref} .- Valor verdadero (asignado, consenso).

u_{lab}^2 .- Incertidumbre estándar del valor por el participante.

u_{ref}^2 .- Incertidumbre estándar del valor de referencia.

Igualmente que para el caso del **En**, la expresión (45) puede transformarse en:

$$\xi = \frac{|x_{lab} - X_{VA}|}{\sqrt{u_{lab}^2 + u_{X_{VA}}^2}} \quad (46)$$

Esta forma de medir el ξ no es muy usada fundamentalmente porque al utilizar el valor de consenso estimado por los propios valores reportados por los participantes el valor asignado se correlaciona.

El criterio de aceptación es un poco más amplio y descriptivo, para ambos casos, permitiéndose interpretaciones del tipo de cuestionable:

- $|\xi| \leq 2$ satisfactoria la comparación
- $2 \leq |\xi| \leq 3$ el resultado es cuestionable.
- $|\xi| > 3$ el resultado es no satisfactorio.

3.4. ANÁLISIS DE VARIANZA.

El análisis de varianza [1],[2],[3] se utiliza para comprobar si hay diferencias estadísticamente significativas entre medias cuando tenemos más de dos muestras o grupos en el mismo planteamiento, caso este que es recurrente en las comparaciones o controles de calidad de las mediciones.

El análisis de varianza se da prioridad al análisis que se pueda realizar con la t de student porque esta última técnica debe utilizarse solo cuando comparamos únicamente las medias de dos muestras. Esto es claro porque cuando tenemos más de dos muestras y comparamos las medidas de dos en dos suben las probabilidades de error al rechazar la hipótesis de no diferencia. Esto queda suficientemente explicado por los factores aleatorios.

En este trabajo damos prioridad al análisis de varianza en lugar de las pruebas t de student porque con la prueba t comprobamos si dos muestras proceden o no de la misma población, esa es la limitante. El hecho de cuando tenemos más de dos grupos utilizar la prueba t de student comparando todos los grupos de dos en dos tiene algunas implicaciones:

- Al hacer muchas comparaciones de dos en dos, aumentamos la probabilidad de que algunas diferencias resulten significativas y entonces cabe la posibilidad de confirmar que hay diferencias, es decir, no aceptar la hipótesis nula, cuando realmente no la hay.

- Una prueba estadística que parcializa los datos y no los examina todos simultáneamente es menos estable. El error típico que expresa la variación en las medias que podemos encontrar en diversas muestras es menor cuando el número de observaciones es mayor.
- Mayor tiempo en los análisis. El número de comparaciones de dos en dos de k elementos es igual a $\frac{k(k-1)}{2}$; con seis grupos habría que hacer 15 comparaciones y con 10 grupos el número de comparaciones es de 45. El análisis de varianzas nos dice de entrada si hay o no diferencias significativas entre pares de medias y si no las hay, no necesitamos hacer más análisis.

Con la t -student comprobamos si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de dos muestras o grupos; es decir, comprobamos si las dos medias difieren más de lo que consideramos normal cuando las muestras proceden de la misma población o, lo que es lo mismo, si las medias no difieren entre sí más de lo que es normal que difieran las observaciones entre sí.

Con el análisis de varianza comprobamos si existen diferencias estadísticamente significativas entre más de dos grupos, es decir, comprobamos si las diversas muestras podemos considerarlas muestras aleatorias de la misma población. Es el método ideal cuando existen más de dos grupos en el mismo supuesto.

La interpretación del análisis de varianza es simple:

- Una varianza grande significa que hay variación considerable, es decir hay diferencias significativas respecto a la media.
- Una varianza pequeña nos indica poca variabilidad entre las observaciones.

La varianza, en otras palabras, mide todo lo que hay de diferente entre las observaciones.

La varianza se puede descomponer en varianzas parciales y a esta descomposición de la varianza se denomina justamente análisis de varianza.

La varianza etimológicamente expresa variación y si podemos descomponerla, podemos aislar fuentes de variación. Cuando de las observaciones o mediciones tenemos varios tipos de información, el análisis de varianza nos va a responder de dónde vienen las diferencias.

Directamente el análisis de varianza nos dice si entre dos o más varianzas existen diferencias estadísticamente significativas, pero lo que realmente deseamos comprobar es si hay diferencias entre una serie de medias.

El razonamiento para explicar el análisis de varianza es sencillo y además aplicable a diversas situaciones al margen del análisis estadístico. La diversidad o variación que encontramos dentro de los grupos, expresada por la varianza dentro de los grupos, es la diversidad normal, aleatoria. Lo normal es que no todos los datos de una muestra sean idénticos en una determinada característica. Si las medias difieren entre sí, o sea la varianza entre grupos, más de lo que se puede esperar, afirmaremos entonces que las medias son distintas o lo que es lo mismo que las muestras proceden de poblaciones distintas con distinta media.

Entonces la varianza total se descompone en dos varianzas:

- Una varianza nos va a expresar las diferencias entre las medias; entre los grupos.
- La otra varianza nos va a expresar las diferencias o variabilidad entre las observaciones; dentro de los grupos y que consideramos como la variabilidad normal.

Si la variación entre las medias, grupos, es mayor que la diversidad entre los sujetos dentro de los grupos, es cuando afirmaremos que entre las medias hay diferencias superiores a lo que podemos encontrar por azar.

Revisando la ecuación 7:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (7)$$

Podemos observar que se trata de una razón o división que posee un numerador y un denominador.

El numerador es la diferencia de todos los datos con respecto a la media, elevadas al cuadrado, por ello se le denomina a este numerador como la suma de cuadrados (SC). Esta suma de cuadrados puede determinarse por:

$$SC = s^2(n-1) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (47)$$

Por su parte el denominador de la varianza es el número de observaciones menos uno. Se realiza la resta de la unidad porque se trata de estimaciones de la varianza en la población. El denominador se conoce frecuentemente como los grados de libertad.

Para el análisis de varianza se realizan dos hipótesis: la hipótesis nula y la alterna.

- Si el análisis de varianzas nos impulsa a aceptar la hipótesis nula, se concluiría que las diferencias observadas entre las medias de las muestras se deben a la variación casual en el muestreo y por tanto, que los valores medios de población son iguales.
- Si se rechaza la hipótesis nula, se concluiría que las diferencias entre los valores medios de la muestra son demasiado grandes como para deberse únicamente a la casualidad y por ellos, no todas las medias de población son iguales.

Existen tres supuestos básicos que se deben satisfacer antes de que se pueda utilizar el análisis de varianza.

- Las muestras deben ser de tipo aleatorio independiente.
- Las muestras deben ser obtenidas a partir de poblaciones normales.
- Las poblaciones deben tener varianzas iguales: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$

Esta herramienta tiene la ventaja que permite diseñar una comparación con múltiples variables.

Para esta prueba es muy recomendable utilizar el Excel.

3.5. PRUEBA FISHER, F .

La prueba F (prueba Fisher) [1] se utiliza comúnmente para evaluar si existe consistencia entre las precisiones en condiciones de repetibilidad σ_r de los participantes. Esta razón estadística también se conoce como distribución de razón de varianzas.

Esta razón F , fue creada por Ronald Fisher (1890 – 1962) y el valor estadístico de la prueba se debe comparar con un valor tabular de F , que indicará el máximo del valor estadístico de prueba que ocurre si H_0 fuera verdadera, a un nivel de significación seleccionado.

Esta técnica es muy útil cuando no se conoce σ_0 , caso este común en los laboratorios de calibración, pero tiene la limitante que solo puede usarse para realizar comparaciones entre dos participantes. En el caso de que haya más de dos, se tendrá que hacer la prueba múltiple de las posibles combinaciones entre participantes con su correspondiente riesgo. Otra opción es hacer un análisis de varianza.

La distribución F encuentra enorme aplicación en la comparación de varianzas muestrales. Las aplicaciones de esta distribución se encuentran en problemas que implican dos o más muestras.

Entre sus características pueden enumerarse:

- Existe una distribución F para cada combinación de tamaño de muestra y número de muestras. Los valores críticos para los niveles 0,05 y 0,01 generalmente se proporcionan para determinadas combinaciones de tamaños de muestra y número de muestras.
- La distribución F es continua respecto al intervalo de 0 a $+\infty$. La razón más pequeña es 0 y nunca puede ser negativa, ya que ambos términos de la razón F están elevados al cuadrado. Hay que considerar que grandes diferencias entre los valores medios de la muestra, acompañadas de pequeñas varianzas muestrales pueden dar como resultado valores extremadamente grandes.
- La forma de cada distribución de muestreo teórico F depende del número de grados de libertad que estén asociados a ella. Tanto el numerador como el denominador tienen grados de libertad relacionados.

El estadístico F se define como la razón de dos variables aleatorias χ^2 independientes, dividida cada una entre su número de grados de libertad. De aquí podemos escribir:

$$F = \frac{\frac{U}{v_1}}{\frac{V}{v_2}} \quad (48)$$

Donde U y V son variables aleatorias independientes que tienen distribuciones χ^2 con v_1 y v_2 grados de libertad, respectivamente.

Para calcular la F , se debe calcular primero la estimación interna:

- Determinar la varianza de cada muestra por la ecuación (7):
- Calcular primeramente la varianza de las medias muestrales:

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{k-1} \quad (49)$$

Donde:

s_x^2 Varianza de las medias.

- \bar{x} Medias aritmética.
- $\bar{\bar{x}}$ Medias de las medias aritméticas.
- k Número de medias.

- Multiplicar la varianza de las medias muestrales por n:

$$s_x^2 \times n \quad (49.1)$$

- Obtener la estimación interna de la varianza (varianza promedio de la muestra):

$$s_w^2 = \frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_k^2}{k} \quad (50)$$

Estimar entonces la F_{prueba} :

$$F_{prueba} = \frac{s_x^2}{s_w^2} = \frac{n \times s_x^2}{\left(\frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_k^2}{k} \right)} \quad (51)$$

Esta F_{prueba} se deberá comparar con la $F_{crítica}$ ($F_{prueba} > F_{crítica(\alpha, v_1, v_2)}$) y se deben realizar las siguientes hipótesis:

Nula: H_0 :- Todas las proporciones de la población son iguales.

Alternativa: H_1 :- No todas las proporciones de la población son iguales.

3.6. PRUEBA CHI CUADRADA (χ^2).

La distribución Chi-cuadrada χ^2 [1] permite calcular la probabilidad existente para que una variable x , que tiene un determinado grado de libertad frente a otras variables del mismo conjunto, permanezca dentro de "límites ideales" previstos para x cuanto tiene ese específico grado de libertad o independencia.

La χ^2 juega un papel fundamental en la inferencia estadística. Tiene una aplicación considerable tanto en la metodología como en la teoría. La distribución χ^2 es un componente importante de la

prueba de hipótesis y la estimación estadística, asunto este que veremos en concreto en la determinación de los valores críticos de R_B y δ_{SMi} .

Es condición que la media y la varianza de la distribución χ^2 son:

$$\mu = \nu \quad \text{y} \quad \sigma^2 = 2\nu$$

En otras palabras, la distribución χ^2 suministra un modelo ideal sobre los límites probables que deberían regir las fluctuaciones en la aparición de un determinado valor aleatorio x dependiendo del grado de libertad que tiene ese valor frente a otras variables similares dentro de un conjunto de datos analizados.

En otras palabras la χ^2 es la distribución muestral de s^2 . Es decir si se extraen todas las muestras posibles de una población normal y a cada muestra se le calcula su varianza, se obtendrá la distribución muestral de varianzas.

Por otro lado, la estabilidad del sistema se evalúa en primer lugar por la realización de una serie de mediciones repetidas de una muestra apropiada y luego probar estas mediciones en contra de una distribución estadística con χ^2 .

La hipótesis básica de este ensayo radica en el hecho que si los resultados obtenidos pueden ser considerados para ser extraídos de una distribución de Poisson, no hay razón para pensar que el instrumento introduce fluctuaciones anormales.

La χ^2 se puede estimar por la siguiente ecuación:

$$\chi_{calc}^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \quad (52)$$

También puede ser expresada como:

$$\chi_{calc}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{u^2(x_i)} \quad (52.1)$$

Donde

x_i Resultado de las mediciones reportadas por los laboratorios.

\bar{x} Media de los resultados de todos los laboratorios.

$u^2(x_i)$ Incertidumbre de medida de cada resultado.

ó

$$\chi_{calc}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - X_{VA})^2}{u^2(x_i)} \quad (53)$$

Donde

x_i Resultado de las mediciones reportadas por los laboratorios.

X_{VA} Valor de consenso por técnicas robustas.

$u^2(x_i)$ Incertidumbre de medida de cada resultado.

Si $\chi_{calc}^2 > \chi_{crit}^2$, se elimina el valor más extremo.

3.7. ERROR MEDIO CUADRÁTICO.

3.7.1. GENERALIDADES.

En estadística el error cuadrático medio (δ_{MSi}) [22], o mean square error en inglés, se utiliza para evaluar la diferencia entre un valor medido y el valor real de la cantidad que se quiere calcular. Entiéndase por valor real al valor verdadero o valor convencionalmente verdadero.

Esta diferencia (δ_{MSi}) se tiene que producir debido a la aleatoriedad de los propios datos en esencia o porque el estimador (valor medido) no tiene en cuenta toda la información para poder producir una estimación más precisa del valor.

El δ_{MSi} es el segundo momento (sobre el origen) del error y por lo tanto incorpora tanto la varianza del estimador como su sesgo. Para un estimador insesgado (o sea sin error) el δ_{MSi} es, entonces, la varianza del estimador.

Cotidianamente los valores del δ_{MSi} pueden usarse para fines comparativos, es decir: dos o más modelos de medición pueden compararse estadísticamente utilizando los valores del δ_{MSi} para medir qué tan bien representan un determinado conjunto de observaciones.

Al igual que la varianza el δ_{MSi} tiene las mismas unidades de medida que el cuadrado de la cantidad que se estima, entonces haciendo una analogía con la desviación estándar, la raíz cuadrada del δ_{MSi} tiene las mismas unidades que la cantidad que se determina.

En Metrología el error medio cuadrático es una de las razones metrológicas. Particularmente mide cuan cerca o distante se encuentra cada valor medido respecto a un valor de referencia o valor asignado.

Un error medio cuadrático igual a cero significa que el modelo de medición permite obtener resultados con perfecta exactitud que sería el ideal de la Metrología pero que lamentable y prácticamente es imposible de obtener, fundamentos estos para el desarrollo del concepto de incertidumbre de medida.

Así, el δ_{MSi} evalúa la calidad de un valor medido o conjunto de predicciones en cuanto a su variación y el grado de sesgo, por consiguiente los valores del error medio cuadrático son usados para propósito de comparaciones de resultados. Un error medio cuadrático insesgado con una varianza pequeña es siempre la mejor predicción.

3.7.2. DETERMINACIÓN DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO.

El error medio cuadrático se puede determinar de diferentes formas:

- Para comparaciones donde existe una referencia del valor de medición, determinada por técnicas superiores:

$$\delta_{MS_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2}{n}} \quad (54)$$

Donde:

- δ_{MSi} Es el error medio cuadrático.
- x_i Son los resultados de las mediciones de cada participante.
- x_{ref} El resultado de la referencia.
- n Número de laboratorios.

La ecuación 54 incluye una desviación estándar y como tal el error medio cuadrático es una medida de dispersión.

En este modelo (54) el δ_{MS_i} representa la diferencia entre las observaciones reales y los valores de observación predichos por el modelo. Se utiliza para determinar el grado en el cual el modelo de medición se ajusta a las mediciones particulares. Es importante destacar que este modelo permite la remoción de algunas variables, para simplificación práctica del modelo de medición, sin que se dañe, significativamente, la capacidad predictiva del modelo.

- Para comparaciones donde el valor de referencia es estimado por técnicas estadísticas robustas de consenso que involucren tanto las incertidumbres como los valores de los participantes:

$$\delta_{MS_i} = \frac{\sqrt{(x_i - X_{VA})^2 + u^2 + u_{VA}^2}}{\hat{\sigma}} \quad (55)$$

Donde:

x_i Son los resultados de las mediciones de cada participante.

X_{VA} Valor asignado por consenso a través de técnicas robustas.

u_x Incertidumbre estándar de los laboratorios.

$u_{X_{VA}}$ Incertidumbre del valor asignado.

$\hat{\sigma}$ Es la desviación estándar.

El valor de referencia asignado en esta ecuación se calcula por la expresión (43) que se reproduce:

$$X_{VA} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{u_{x_i}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_{x_i}^2} \right)} \quad (43)$$

El valor de la incertidumbre del valor asignado se presentó en la ecuación (44):

$$u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{x_i}^2}}} \quad (44)$$

La incertidumbre estándar de los laboratorios se calcula por la ecuación:

$$u_{lab} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - X_{VA})^2}{n - 1}} \quad (56)$$

que no es más que la incertidumbre de la desviación estándar.

Mientras que el valor de $\hat{\sigma}$ se puede considerar como la desviación estándar para el propósito o desviación estándar del método. Como trabajamos con métodos no normalizados, frecuentemente no conocemos ese valor. Por consiguiente sugerimos el uso de la siguiente expresión:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{(\bar{x}_i - \bar{X})}{n}} \quad (57)$$

Donde:

- \bar{x}_i Son los resultados promedios de las mediciones de cada participante.
- \bar{X} Valor promedio de los resultados promedios de las mediciones de cada participante.
- $\hat{\sigma}$ Es la desviación estándar.
- n Número de laboratorios.

3.7.3. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE COMPARACIÓN DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO.

Uno de los objetivos de este trabajo es la determinación del valor de comparación para el error medio cuadrático.

La forma de expresar el valor crítico o de comparación para el $\delta_{MSC\alpha}$ varía mucho dependiendo de quien realiza el estudio, fundamentalmente porque no existe documento normalizativo que introduzca una recomendación generalizada para la determinación y establecimiento del mismo.

De este modo en comparaciones nacionales organizadas por proveedores de ensayos de aptitud, ema o cenam no hemos encontrado la explicación de la forma en que se establece el valor del $\delta_{MSC\alpha}$ o valor de comparación.

En esos casos se ha optado por considerar la opinión de un determinado grupo de expertos en la materia, cuestión esta muy válida. Sin embargo este asunto ha tenido diversos comentarios a favor y en contra de esa práctica y por otra parte para la evaluación del punto 5.9 de la norma NMX-EC-17025 [] la entidad acreditadora nos exige un valor estadístico o la manera científica de hallarlo.

En otros ejercicios interlaboratorios el valor crítico de δ_{MSi} se ha determinado como:

$$\delta_{MSC\alpha} = \frac{EMT}{3} \quad (58)$$

Donde:

EMT error máximo tolerado del instrumento bajo calibración.

Es decir, se está considerando que el sesgo o error de los participantes con respecto al valor de referencia o valor de consenso no debe ser mayor al tercio del valor del error máximo tolerado del ibc, asunto este que cuenta con justificación importante en los documentos legales de Metrología en los que se establece que para que un instrumento, medida materializada o patrón cumpla con las especificaciones de una clase o grado de exactitud determinado debe tener una incertidumbre que sea del orden del tercio del EMT. ¿Correcto el planteamiento? ¿Incorrecto? Hay opiniones sobre ambas cuestiones.

A nuestro modo de ver considerar el EMT como una referencia puede ser funcional para instrumentos patrones o que se clasifiquen en grados o clases de exactitud.

En otros ejercicios de comparaciones se propone que:

$$\delta_{MSC\alpha} = \frac{Res}{3} \quad (59)$$

Donde:

Res resolución del instrumento bajo calibración.

En este caso se está tomando una característica del ibc que es permanente durante su uso útil. Es buena opción. Sin embargo los instrumentos pueden presentar errores de funcionamiento o de otro tipo que sobrepasan al valor de la resolución. ¿En estos casos tomar en consideración la resolución es conveniente?

Para el caso de muchos instrumentos de medición del tipo, citemos algunos, micrómetros analógicos, indicadores analógicos, termómetros de líquido en vidrio, medidas volumétricas, etc., la resolución es meramente informativa. Durante su calibración los laboratorios debemos usar un criterio de discernimiento o de estimación en cuanto a la resolución de lectura o de calibración que se convierte en un nuevo término: resolución de estimación.

Esto está fundamentado en que esos instrumentos pueden tener una resolución mucho mayor al error permisible del instrumento.

Por ejemplo, un micrómetro analógico con resolución de 0,01 mm e intervalo de medida de 50 mm tiene un error máximo permitido de $\pm 0,004$ mm, valor este que por la resolución del instrumento no se puede determinar.

Entonces cabe el cuestionamiento ¿Es funcional para estos casos la ecuación 59? Consideramos que habría que hacerle algunas correcciones o mejoras.

Considerando todo ello e investigando en buenas prácticas de mediciones podemos obtener un $\delta_{MSC\alpha}$ que involucre los datos propios del mismo ejercicio, es decir, que involucre cada una de las mediciones a través de la siguiente ecuación:

$$\delta_{MSC\alpha} = \sqrt{1 + \chi^{-2}} \times \frac{u_{tot}}{\hat{\sigma}} \quad (60)$$

Donde:

χ^{-2} Función χ^2 inversa.

u_{tot} Incertidumbre total, que involucra las incertidumbres del valor asignado y las incertidumbres de los participantes.

$\hat{\sigma}$ Desviación estándar para el propósito.

Ahora bien ¿Qué es la desviación estándar para el propósito? En parte se considera como la desviación estándar que se requiere alcanzar para el método bajo control, es decir, el nivel de efectividad o lo deseable para el propósito de este control que se espera que alcancen en el control de calidad o ensayo de aptitud para el método de medición determinado.

Este valor de la desviación estándar puede ser calculado por la ecuación 57 como ya se mencionó:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (57)$$

Por su parte la u_{tot} puede determinarse por la ecuación:

$$u_{tot} = \sqrt{u_{lab}^2 + u_{VA}^2} \quad (61)$$

Donde:

u_x Incertidumbre estándar de los laboratorios que se determina por la ecuación 56 que se reproduce:

$$u_{lab} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - X_{VA})^2}{n-1}} \quad (56)$$

u_{XVA} Incertidumbre estándar del valor asignado, que se determina por la ecuación (44), que se reproduce:

$$u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_{x_i}^2}} \quad (44)$$

Interpretación

Para que el valor de δ_{MSi} se considere aceptable debe cumplirse siempre que:

$$\delta_{MS_i} \leq \delta_{MSC\alpha} \quad (62)$$

Un valor de δ_{MSi} igual a 0 es el ideal y significa que el estimador de $\hat{\sigma}$ predice las observaciones del parámetro con una precisión perfecta.

3.8. RELACIÓN DE BIRGE (R_B).

Bien conocidos son los cocientes financieros como el conjunto de razones difundidas y que se usan para realizar el análisis de la información estimando los cocientes de dos o más datos. Así mismo existen las razones metrológicas como el error normalizado (En), el error medio cuadrático (δ_{MSi}) y ahora se introduce la razón o relación e Birge (R_B) [18],[19],[20],[21].

La relación de Birge se conoce, está difundida y se usa ampliamente en las intercomparaciones claves entre laboratorios primarios y su principal uso es para probar la consistencia de un grupo de datos, algo parecido al uso de la prueba de Cochran.

Para el uso de la relación de Birge se parte que los datos tienen una distribución normal donde la esperanza de la media es igual a cero y la varianza es igual a 1., asunto este que explica por qué se espera que los valores de la R_B sean menores o iguales a 1 para que se consideren consistentes.

3.8.1. DEFINICIÓN DE LA RELACIÓN DE BIRGE.

Partiendo de que en comparaciones internacionales la relación de Birge se define por la ecuación:

$$R_B = \frac{u_{ext}}{u_{int}} \quad (63)$$

Donde:

u_{ext} Incertidumbre estándar del valor asignado, consultar ecuación.

$u_{int} = u_{VA}$ Desviación estándar de la dispersión de los resultados x_i , ponderados con sus respectivas incertidumbres asociadas.

Tenemos que:

$$u_{ext} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i)(x_i - X_{VA})^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i)}} \quad (64)$$

Donde:

x_i Resultados de cada participante.

u_{xi}^2 Incertidumbre del valor reportado por el participante.

X_{VA} Valor de referencia asignado (consultar ecuación (43)).

n Número de participantes

Y la incertidumbre interna es la desviación interna que se obtiene de las incertidumbres que reportan los participantes a través de la ecuación (consultar ecuación (44)):

$$u_{int} = u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{xi}^2}}} \quad (44)$$

3.8.2. USO DE LA RELACIÓN DE BIRGE EN COMPARACIONES INTERNACIONALES.

En las intercomparaciones claves se espera siempre que $R_B \leq 1$, asunto este que es muy probable porque todos los laboratorios primarios definen las unidades de medida por el mismo método normalizado.

No obstante esta condición podemos probarla a partir de la ecuación 63:

Retomando.

$$R_B = \frac{u_{ext}}{u_{int}}$$

Sustituyendo en ella las ecuaciones 64 y 44 tenemos:

$$R_B = \frac{u_{ext}}{u_{int}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i)(x_i - X_{VA})^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i)}}}{\sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{x_i}^2}}} \quad (63.1)$$

$$R_B = \sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{u^2(x_i)}}{(n-1)\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_2(x_i)}}} = \sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{u^2(x_i)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{x_i}^2}}{1}}{(n-1)\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_2(x_i)}}} \quad (63.2)$$

$$R_B = \sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{u^2(x_i)}}{(n-1)}} \quad (63.3)$$

Recordando que:

$$u^2(x_i) = \frac{(x_i - X_{VA})^2}{n-1} \quad (56)$$

y sustituyendo en 63.3, tenemos:

$$R_B = \sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{(n-1)}}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{(n-1)} \cdot \frac{(n-1)}{(x_i - X_{VA})^2}} = 1 \quad (63.4)$$

Ahora bien, en las intercomparaciones claves como ya se ha dicho, se tiene que esperar esto debido a que las incertidumbres en las definiciones de las unidades de medida en cuestión tienen que ser del mismo orden, igualmente los métodos para definir las unidades de medida son únicos y deben cumplirse perfectamente para poderlas reproducir, de lo contrario se caería en errores del modelo de medición, se indefiniría el mensurando y no se obtendría la definición de la unidad con errores e incertidumbres en el orden necesarios.

Para los laboratorios de calibración no es exactamente igual: se necesita calcular la R_{Bi} y luego compararla contra un valor crítico o esperado $R_{BC\alpha}$ de la misma, siendo este otro objetivo del presente trabajo.

3.8.3. RELACIÓN DE BIRGE DE COMPARACIÓN PARA LABORATORIOS DE CALIBRACIÓN.

Para hallar una razón metrológica de comparación para la relación de Birge, se propone asociar esta con una distribución de probabilidad χ^2 .

Retomemos la ecuación 63.3:

$$R_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{\frac{u^2(x_i)}{(n-1)}}} \quad (63.3)$$

Analicemos el numerador de la ecuación anterior:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{u^2(x_i)} \quad (63.5)$$

Recordando que la χ^2 observada se determina por la ecuación:

$$\chi_{obs}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{s^2} \quad (64)$$

Y conociendo que u_{xi}^2 es la Incertidumbre o desviación estándar asociada al valor reportado por el participante x_i y que además, en nuestro caso, $\bar{X} = X_{VA}$; podemos concluir que:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{u^2(x_i)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{s^2} = \chi^2 \quad (65)$$

Entonces tenemos ya un valor de comparación para la R_B :

$$R_{B_{Ca}} = \sqrt{\frac{\chi^2}{n-1}} \quad (66)$$

O lo que es lo mismo:

$$\chi^2 = R_B^2(n-1) \quad (66.1)$$

La consistencia se satisface si y solo si:

$$P\{\chi^2(n-1) > \chi_{obs}^2\} < 0,05 \quad (67)$$

Obteniendo el valor de comparación o crítico de la relación de Birge a través de una distribución χ^2 con una probabilidad del 95 %.

Este procedimiento es aplicable para comparaciones con circulaciones simples del ítem.

Con este procedimiento el nivel de equivalencia de cada participante puede expresarse cuantitativamente por dos términos:

- a) La desviación de cada participante con respecto al valor asignado.
- b) La incertidumbre de esa desviación al 95% de confianza.

Puede ser usado siempre y cuando se cumpla que:

- a) El ítem de ensayo o de comparación sea estable, es decir, con variaciones no significativas durante la prueba.
- b) Las mediciones de cada participante sean realizadas independientemente de las mediciones de los otros participantes. La implicación de esta condición es que no halla dependencia mutua entre los participantes.
- c) Para cada resultado de medida de cada participante puede ser asignada una distribución normal, es decir, con media calculada de las mediciones de los participantes y desviación estándar igual a la incertidumbre estándar provista por los participantes.

3.8.4. CONSIDERACIONES DEL VALOR ASIGNADO (X_{VA}).

Es importante destacar que el valor asignado (X_{VA}) es un estimado del mensurando considerando los resultados provistos por los laboratorios o participantes en la comparación y calculado a través de una media ponderada que involucra los resultados de las mediciones de los participantes y sus respectivas incertidumbres.

Para el caso de comparaciones simples en las que se decida definir el valor asignado a través de una media simple el valor asignado quedaría:

$$X_{va} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (68)$$

Donde:

X_{va} Es el valor asignado por una media aritmética simple.

x_i Son los resultados de cada participante.

n Número de laboratorios.

El valor de incertidumbre de esta simple media aritmética se determina por:

$$u_{va} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(x_i)} \quad (69)$$

Donde:

u_{va} Es la incertidumbre del valor asignado.

$u^2(x_i)$ Son las incertidumbres reportados para los resultados de cada participante.

n Número de laboratorios.

La equivalencia o consistencia de los datos, para este caso, típicamente toma la forma de la diferencia entre las mediciones de cada participante y la media simple:

$$d_i = x_i - X_{va} \quad (70)$$

Donde:

d_i Diferencia entre las mediciones de cada participante y el valor signado o media simple.

x_i Son los resultados de cada participante.

X_{va} Es el valor asignado por una media aritmética simple.

La incertidumbre estándar $u(d_i)$ en el caso en que X_{va} sea evaluada como una simple media aritmética y la $u_{X_{va}}$ por la ecuación 68, se expresa por la siguiente ecuación:

$$u(d_i) = \sqrt{u^2 x_i + u^2_{va} - \frac{2}{n} u^2 x_i} \quad (71)$$

Donde:

$u(d_i)$ Incertidumbre estándar del valor d_i .

$u^2 x_i$ Son las incertidumbres reportados para los resultados de cada participante.

u^2_{va} Es la incertidumbre del valor asignado.

n Número de laboratorios.

Esta ecuación es perfectamente utilizable debido a que considera la correlación de cada participante con el valor de la media simple.

La desviación crítica y su valor de consistencia pueden ser calculadas por:

$$E_i = \frac{d_i}{ku(d_i)} \quad (72)$$

Donde:

d_i Diferencia entre las mediciones de cada participante y el valor signado o media simple.

$u(d_i)$ Incertidumbre estándar del valor d_i .

k Es el factor de cobertura (en nuestro caso igual a 2).

Debiendo satisfacerla la relación 73 para que haya coherencia o equivalencia entre los resultados:

$$|E_i| \leq 1 \quad (73)$$

Resumiendo, la selección del valor asignado a partir de la media ponderada robusta, la media aritmética simple o de la mediana usualmente depende de la consistencia general del conjunto de datos, de la experiencia en esas mediciones y de la intención del estudio.

Para el propósito único de proveer evidencia científica para soportar los controles de calidad y las comparaciones entre los participantes, la varianza inversa de la media ponderada tiene ventajas sobre las otras dos técnicas para asignar el valor asignado ya que tanto los valores reportados por los participantes como sus incertidumbres estándar asignadas pueden ser evaluadas en la prueba de consistencia.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL SISTEMA INFORMÁTICO PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.

4.1. GENERALIDADES.

Una de las actividades planteadas en el objetivo de esta tesis fue crear una herramienta estadística (software o aplicación) que permita a los laboratorios de Metrología del CIDESI la planeación, desarrollo, valoración, evaluación y reporte de las actividades que desarrollan para garantizar la calidad de las mediciones.

Una primera tarea que tuvimos en frente fue definir los requisitos de esta herramienta, sin darnos cuenta que en la ingeniería o desarrollo de softwares esta etapa es primordial y es un área del conocimiento explícita que se encarga de la obtención, análisis, especificación y validación de los requisitos para los softwares. Es ampliamente reconocido dentro de la industria de desarrollos de programas informáticos que los proyectos de ingeniería de software son sumamente vulnerables cuando las actividades de planeación y análisis de requisitos de softwares se realizan mal, no se revisan conjuntamente con el cliente o el dueño de la idea o no se entiende correctamente la necesidad del cliente.

Por todo ello expresamos, desde nuestra visión, la necesidad concreta de la herramienta informática y las limitaciones actuales relacionadas con el aseguramiento de la calidad de los resultados de las mediciones. Concretamente expresamos nuestra necesidad como: **Desarrollo e implementación de sistema informático para el análisis de datos, en el aseguramiento de la calidad de los servicios de los laboratorios de metrología de CIDESI.** Con un enfoque más amplio se decide que la herramienta también puede llegar a ser usada por laboratorios foráneos en apoyo al desarrollo de controles de la calidad que no pueden ser realizados por el mismo CIDESI, debido fundamentalmente, a que en las otras sedes no exista el alcance, por ejemplo.

Para lograr este objetivo definimos claramente nuestros requisitos del software considerando lo establecido en la Guide to the software Engineering body of knowledge. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)[17].

Los requisitos de los softwares, en su forma más básica, son una propiedad que debe ser atendida con el fin de resolver algún problema real. En nuestro caso el requisito era crear una herramienta informática que combinase varias técnicas estadísticas de análisis de datos que posibiliten casualmente el análisis de los mismos y la toma de consideraciones. De la misma manera la herramienta debía conjuntar la posibilidad de organizar, planear las actividades de control de calidad, facilitar de manera sencilla la participación de los ingenieros en la captura de sus datos y

de forma eficaz evaluarlos ofreciendo al final un informe con las conclusiones correspondiente al ejercicio de control de la calidad.

Con todo ello se formuló una combinación compleja de requisitos técnicos, organizativos y de calidad para el entorno en que debe operar el software.

Se hizo la distinción entre los parámetros del producto del software y los parámetros del proceso como tal, definiendo que los parámetros del producto son los requisitos que necesitamos sean desarrollados, mientras que el parámetro del proceso es esencialmente una restricción en el desarrollo del software.

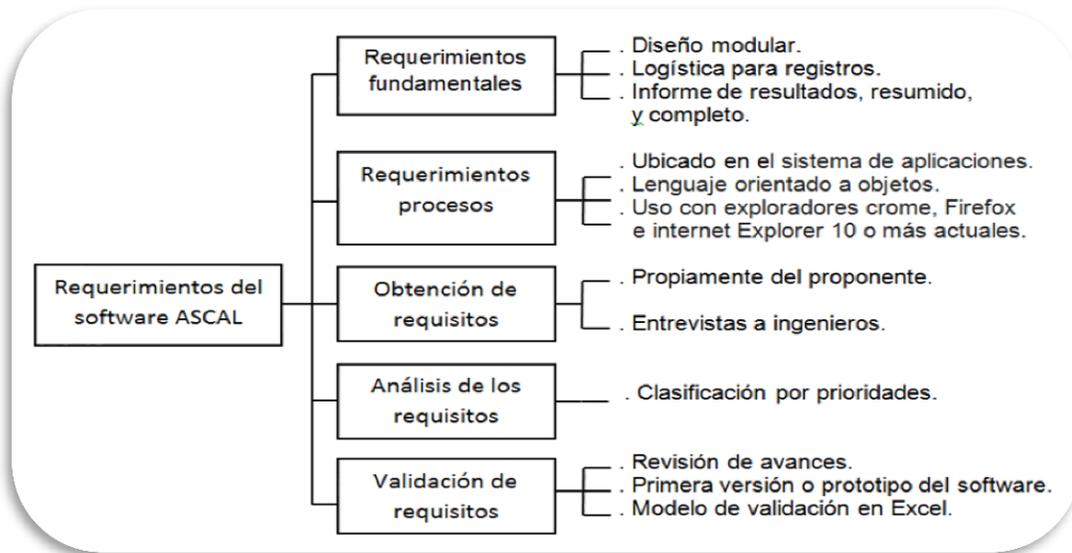


Fig. 10: Desglose de requerimientos para el software.

Como parámetros del software se incluyeron:

- a) El software debe estar diseñado de manera modular, incluyendo módulos para:
 - **Procedimientos:** se incluirán todos los procedimientos que sean susceptibles a los controles de calidad.
 - **Usuarios:** deberán incluirse los usuarios que tendrán derechos a la utilización de la herramienta ya sea como coordinadores de los aseguramientos, como administradores, capturistas y se deberá especificar si pertenece al CIDESI o es un laboratorio externo.
 - **Métodos de aseguramiento:** definición clara y sin ambigüedades del método de medición directo, indirecto, trigonométrico, volumétrico, etc.

- **Técnicas estadísticas:** establecimiento de las técnicas de análisis de los resultados: error medio cuadrático (δ_{SM} , R_B , E_n y en un futuro, análisis de varianzas, indicadores Mandel h y k)
 - **Tipos de aseguramiento:** referido si son interlaboratorios o intralaboratorios.
 - **Tipos de servicios:** acreditado o no acreditado.
 - **Unidades de medida:** definición de unidades, símbolos, múltiplos y submúltiplos.
 - **Magnitudes físicas:** Dimensional, en esta primera etapa.
- b) Debe incluir una logística específica para el registro de los aseguramientos, la consulta de los mismos y los cálculos
- **Registro del aseguramiento** con todas las especificaciones necesarias para su realización.
 - **Consulta** del aseguramiento
 - **Cálculos** del aseguramiento:
- c) **Informe de resultados:** Deberá entregar por cada aseguramiento un informe gerencial y un informe detallado del resultado.

Como parámetros del proceso quedaron definidos:

- i. El software debe estar anclado al sistema de aplicaciones de Metrología.
- ii. El lenguaje utilizado debe ser php, es decir a través del llamado de eventos o funciones.
- iii. La plataforma debe ser web, que corra en exploradores tipo Google Chrome, Firefox e Internet Explorer 10 o más actuales.
- iv. Se debe conectar bases de datos sql, donde se resguardará toda la información.

Se presenta a continuación el paso a paso del software ASCAL, acrónimo de Aseguramiento de la CALidad.

4.2. ASCAL: ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD.



Fig. 11. Imagen del ASCAL.

4.2.1. INTRODUCCIÓN.

Es una aplicación web creada debido al gran crecimiento que han experimentado los laboratorios de calibración, en respuesta a las necesidades de un mercado creciente, que necesita confianza en los resultados de las calibraciones de sus instrumentos patrones para servicios de calibración y medición que les ofrecen los laboratorios de metrología del CIDESI, cumpliendo con las políticas de calidad y los requisitos técnicos y administrativos de la norma NMX-EC-17025 [9], en especial el punto 5.9 “Aseguramiento de la calidad de los resultados de ensayo y calibración”, con el fin de demostrar que los laboratorios y personal operan con un sistema de calidad, que son técnicamente competentes y que son capaces de generar resultados técnicamente válidos.

Este manual le permitirá utilizar todas las funcionalidades básicas del sistema “Aseguramiento de la Calidad V. 2.0” ASCAL.

4.2.2. OBJETIVO DEL MANUAL.

Dar soporte a los usuarios que utilicen el sistema teniendo un control e información oportuna de los requerimientos y funciones del mismo.

4.2.3. REQUERIMIENTOS.

Lo esencial para el buen funcionamiento del sistema es:

- Google Chrome o Internet Explorer 10 o superior
- Mínimo 1GB en RAM
- Resolución gráfica mínimo 800 x 600
- Paquetería de Office 2003 o Superior
- Conexión a internet

4.2.4. OPCIONES DEL SISTEMA.

El presente Manual está organizado de acuerdo a la secuencia de ingreso a las pantallas del sistema de la siguiente manera:

1. Acceso a la aplicación web.
2. Inicio de sesión.
3. Pantalla general.
4. Pantallas de información adicional.
5. Toma de Lecturas.
6. Pantalla resultados numéricos y gráficos.

4.2.5. ACCESO A LA APLICACIÓN.

- a) Para acceder a la aplicación solo es necesario ir a inicio, todos los programas y buscar el navegador de internet.
- b) Para entrar al portal introducir la siguiente liga: <http://slaic.cidesi.mx/ASCAL/>
- c) Se mostrará la siguiente página.

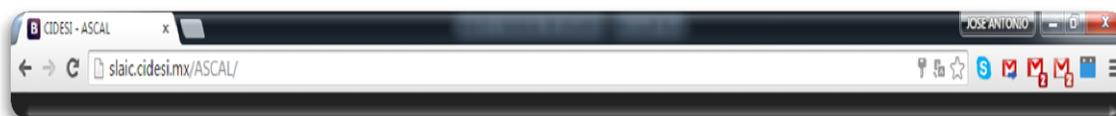


Fig.12: Pantalla con liga para el acceso a la aplicación

4.2.6. INICIO DE SESIÓN.

- a) Ingresar el nombre de usuario y la contraseña:

Nota: Para el acceso a la aplicación previamente debe de haber sido de alta por el Administrador de la aplicación.

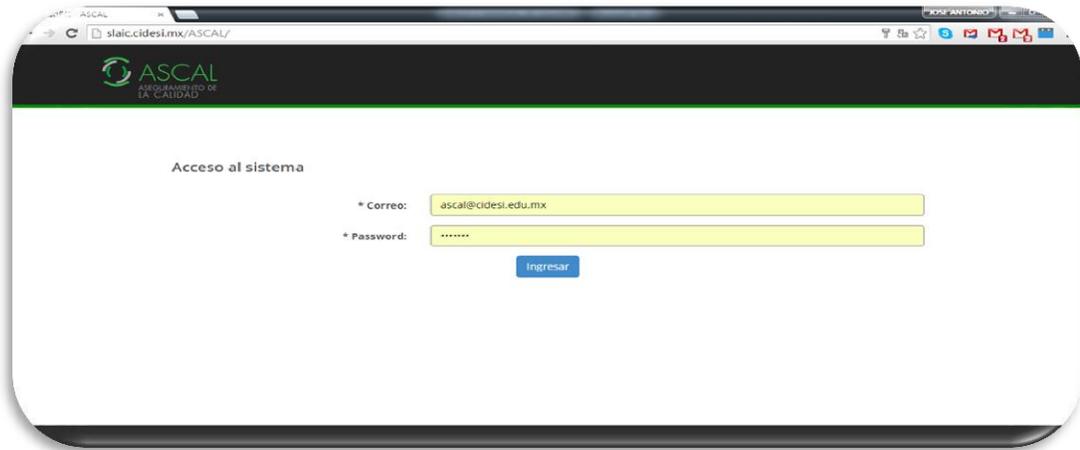


Fig. 13: Pantalla inicio de sesión

- b) Aparecerá un mensaje de bienvenida, la aplicación autentifica los accesos a la aplicación web.

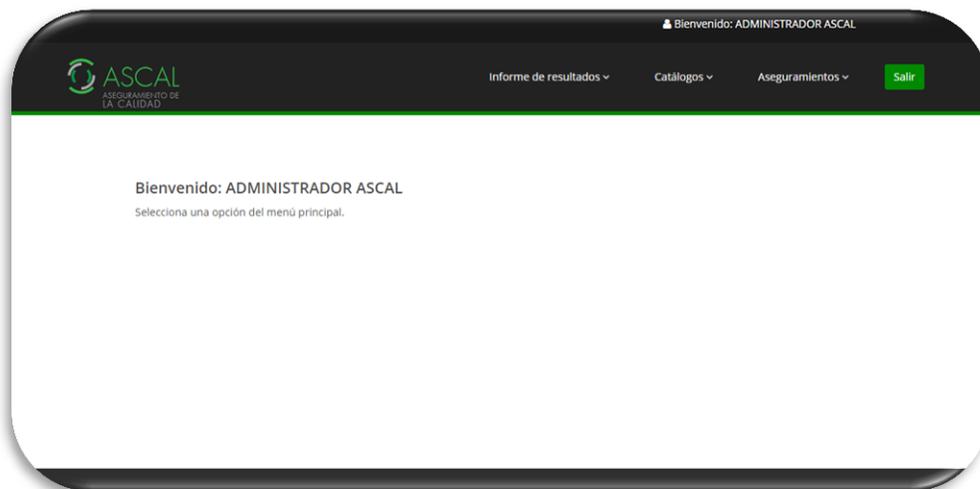


Fig. 14: Pantalla inicio de sesión como administrador.

4.2.7. USUARIOS.

Existen tres tipos de usuarios con los cuales se puede acceder a la aplicación los cuales son:

- a) **PARTICIPANTE:** Solo puede capturar los datos de los aseguramientos en los cuales está participando y consultar los resultados de los informes finales.
- b) **COORDINADOR:** Puede dar de alta nuevos ensayos, consultar resultados, elaboración de informe final, consulta y modificación de aseguramientos.

- c) **ADMINISTRADOR:** tiene control total de la aplicación, por seguridad en la aplicación solo existe un administrador.

4.2.8. CATÁLOGOS.

Esta aplicación web está diseñada por medio de diferentes catálogos que ayudan a su funcionalidad.

- a) Catálogo de procedimientos:

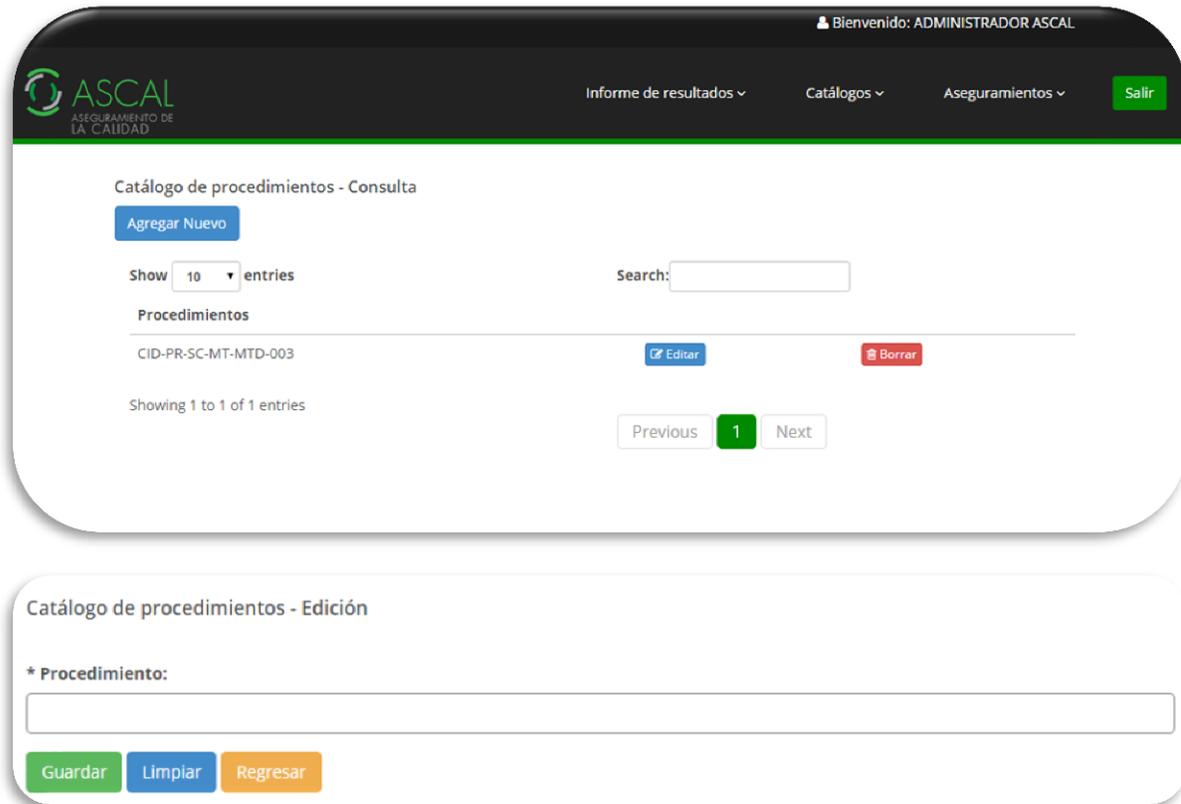


Fig. 15. Catálogo de procedimientos

- b) Catálogo de usuarios:

Catálogo de Empleados - Consulta

[Agregar Nuevo](#)

Show entries

Search:

| Usuario | Nombre | Correo | Coordinador | Administrador | Capturista | CIDESI | | |
|---------|-------------------------------------|----------------------|-------------|---------------|------------|--------|------------------------|------------------------|
| CVE-1 | ADMINISTRADOR ASCAL | ascal@cidesi.edu.mx | SI | SI | NO | SI | Editar | Borrar |
| ASM-001 | AGUSTIN PEREZ MALDONADO | aperez@cidesi.edu.mx | NO | NO | SI | SI | Editar | Borrar |
| ASM-002 | ANDRES ANTONIO BAEZ CERVANTES | abaez@cidesi.edu.mx | NO | NO | SI | SI | Editar | Borrar |
| ASM-003 | MARIO DAGOBERTO DIAZ ORGAZ | mdiaz@cidesi.edu.mx | NO | NO | SI | SI | Editar | Borrar |

Registro de usuarios

Clave:

* Nombre:

* Correo:

* Contraseña:

* ¿ Es Coordinador ? :

* ¿ Es administrador ? :

* ¿ Solo capturista ? :

* ¿ Es CIDESI ? :

Fig. 16: Catálogo de Usuarios

c) Catálogo Método de Aseguramientos.

ASICAL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Informe de resultados ▾ Catálogos ▾ Aseguramientos ▾ Salir

Catálogo Método de Aseguramientos - Consulta

Agregar Nuevo

Show 10 ▾ entries Search:

Método de Aseguramientos

| | | |
|----------------|------------------------|------------------------|
| DIRECTO | Editar | Borrar |
| INDIRECTO | Editar | Borrar |
| TRIGONOMETRICO | Editar | Borrar |
| VOLUMETRICO | Editar | Borrar |

Showing 1 to 4 of 4 entries

Previous 1 Next

Catálogo Metodo de Aseguramientos - Edición

* Metodo de Aseguramientos:

[Guardar](#) [Limpiar](#) [Regresar](#)

Fig. 17: Catálogos de Aseguramientos

d) Catálogo de técnicas estadísticas.

ASICAL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Informe de resultados ▾ Catálogos ▾ Aseguramientos ▾ Salir

Catálogo de técnicas estadísticas - Consulta

Agregar Nuevo

Show 10 ▾ entries Search:

Técnica Estadísticas

| | | |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| CRITERIO DE BIRGE (RB) | Editar | Borrar |
| ERROR MEDIO CUADRÁTICO | Editar | Borrar |
| ERROR NORMALIZADO (En) | Editar | Borrar |

Showing 1 to 3 of 3 entries

Previous 1 Next

Catálogo Técnica Estadísticas - Edición

* Técnica Estadísticas:

[Guardar](#)
[Limpiar](#)
[Regresar](#)

Fig. 18. Catálogo de técnicas estadísticas.

e) Catálogo de Tipo Aseguramientos

Catálogo de Tipo Aseguramientos - Consulta

[Agregar Nuevo](#)

Show entries Search:

| ID | Tipo Aseguramientos | |
|----|---------------------|---|
| 1 | Inter | Editar Borrar |
| 2 | Intra | Editar Borrar |

Showing 1 to 2 of 2 entries

[Previous](#)
[1](#)
[Next](#)

Catálogo de Tipo Aseguramientos - Edición

* Tipo Aseguramientos:

[Guardar](#)
[Limpiar](#)
[Regresar](#)

Fig. 19. Catálogos de tipos de aseguramientos.

f) Catálogo de Tipo de Servicios



[Informe de resultados](#)
[Catálogos](#)
[Aseguramientos](#)
[Salir](#)

Catálogo de Tipo de Servicios - Consulta

[Agregar Nuevo](#)

Show entries Search:

| Tipo de Servicios | |
|-------------------|---|
| ACREDITADO | Editar Borrar |
| NO ACREDITADO | Editar Borrar |

Showing 1 to 2 of 2 entries

[Previous](#)
[1](#)
[Next](#)

Catálogo de Tipo de Servicios - Edición

* Tipo de Servicios:

[Guardar](#)
[Limpiar](#)
[Regresar](#)

Fig. 20: Catálogo de tipos de servicios

g) Catálogo de Unidades de Medida

ASCAL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Informe de resultados ▾ Catálogos ▾ Aseguramientos ▾ [Salir](#)

Catálogo de Unidades de Medida - Consulta

[Agregar Nuevo](#)

Show 10 ▾ entries Search:

Unidades de Medida

| | | |
|----|------------------------|------------------------|
| mm | Editar | Borrar |
|----|------------------------|------------------------|

Showing 1 to 1 of 1 entries

Previous **1** Next

Catálogo de Unidades de Medida - Edición

* Unidades de Medida:

[Guardar](#)
[Limpiar](#)
[Regresar](#)

Fig. 21: Catálogo de unidades de medida.

h) Catálogo de Magnitudes.

ASCAL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Informe de resultados ▾ Catálogos ▾ Aseguramientos ▾ [Salir](#)

Catálogo de Magnitud - Consulta

[Agregar Nuevo](#)

Show 10 ▾ entries Search:

| Clave | Magnitud | ¿ Es CIDESI? |
|-------|-----------------|--------------|
| MDI | DIMENSIONAL QRO | SI |

Showing 1 to 1 of 1 entries

Previous **1** Next

Catálogo de Laboratorios - Edición

* Clave:

* Laboratorio:

* ¿ Es laboratorio CIDESI?:

Fig. 22: Catálogo de magnitudes.

4.2.9. ALTA DE ASEGURAMIENTO.

- a) Una vez capturados los catálogos para realizar un aseguramiento se debe de ingresar primero los datos generales del aseguramiento:

Registro del aseguramiento a realizar

Datos generales del aseguramiento

* Fecha:

* Tipo aseguramiento:

* Nombre aseguramiento:

* Técnica estadísticas de análisis:

ERROR NORMALIZADO (En)
 ERROR MEDIO CUADRÁTICO
 CRITERIO DE BIRGE (RB)

* Coordinador:

* Metodo aseguramiento:

* Magnitud:

* Tipo servicio:

* Número de registro:

* Descripción del aseguramiento:

* Propósito:

Fig. 23: Pantalla principal para el registro de aseguramientos.

Nota: Los datos que se capturan están enlazados con los catálogos

- b) Posteriormente los participantes así como si es referencia (solo aplica para En), fecha en la que recibe, entrega y captura.

Participantes para el aseguramiento

* Número de participantes:

| Participante | ¿Es referencia? | Recibe | Entrega | Captura | |
|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| --- Seleccione --- | Nº | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | Agregar Participante |

Fig. 24: Participantes en el aseguramiento.

- c) Una vez capturados los participantes se deben de capturar los puntos y repeticiones

Puntos de calibración / medición

* Número de puntos:

* Número de repeticiones:

* Unidad de medida del punto de calibración:

* Unidad de medida del error:

* Unidad de medida de la incertidumbre:

* Puntos (i):

Agregar punto al aseguramiento

Fir. 25: Selección de puntos de medición.

- d) Ya capturados la totalidad de los puntos se deben de capturar los datos del equipo (ITEM) con el cual se estará realizando el aseguramiento.

Datos del instrumento

Clave:

* Nombre:

Marca:

Modelo:

* Número de serie:

Número de identificación:

Resolución de medida:

* Intervalo de medida:

Grado:

Clase de exactitud:

Fig. 26: Datos del instrumento, ítem o pieza.

- e) Por último se anexa el protocolo con algunos comentarios, si son necesarios, y se da un clic en el botón

Archivos anexos para el aseguramiento

| Archivo | Título a mostrar |
|--|----------------------|
| <input type="button" value="Seleccionar archivo"/> Ningún archivo seleccionado | <input type="text"/> |

Observaciones generales

Fig. 27: Protocolo o archivos anexos.

4.2.10. PARTICIPANTE CAPTURA DE DATOS.

El participante al ingresar a la aplicación solo visualizará los aseguramientos en los cuales está participando filtrados por Clave/ Nombre/ Tipo y Método.

Bienvenido: MARIO DAGOBERTO DIAZ ORGAZ

Aseguramientos ▾ Salir

Consulta de aseguramientos para captura de datos

| Clave | No. Registro | Nombre | Tipo | Metodo | Capturar datos |
|---------------------|--------------|---|-------|---------|---|
| ASCAL-MDI-2015-0002 | LMD-20150002 | Calibración de indicador de pestaña (entrante) | Inter | DIRECTO | Capturar |
| ASCAL-MDI-2015-0001 | LMD-20150001 | Calibración de Micrómetro para mediciones de exteriores | Inter | DIRECTO | Capturar |

Fig. 28: Pantalla captura de datos por parte de los participantes.

- a) Para capturar solo deberá dar clic en el botón Capturar
- b) Al dar clic en capturar el participante verá la información del aseguramiento en el cual puede participar.

CAPTURACIÓN DE DATOS DEL ASEGURAMIENTO

Datos generales del aseguramiento

| | |
|---|--|
| Clave del aseguramiento: ASCAL-MDI-2015-0002 | No. de registro: LMD-20150002 |
| Nombre del aseguramiento: Calibración de indicador de pestaña (entrante) | Fecha del aseguramiento: 13-07-2015 |
| Tipo del aseguramiento: Inter | Método del aseguramiento: DIRECTO |
| Laboratorio: DIMENSIONAL QRO | Coordinador: ADMINISTRADOR ASCAL |
| Observaciones: VER PROTOCOLO | |

Protocolo del aseguramiento

| Archivo | Descripción |
|------------|---------------------|
| ASCAL.docx | PROTOCOLO INDICADOR |

Datos de la captura

| | |
|---|--|
| Participante: MARIO DAGOBERTO DIAZ ORGAZ | |
| Número de puntos: 11 | |

Fig. 29: Generalidades del aseguramiento.

- c) En este mismo apartado el participante tendrá que dar el acuse de recibido y tomar la decisión de capturar o no

Acuse de recibo

¿Estado del instrumento ó muestra?: --Selecciona-- ▾

Fig. 30: Acuse de recibo del ítem o ibc.

Si el participantes acusa de recibido el estado del instrumento **BUENO**: solo deberá de capturar el error y la incertidumbre y al terminar de capturar la totalidad de los datos dar clic en el botos “guardar” para seguir capturando o “Guardar y enviar” para finalizar su participación y enviar sus resultados.

Acuse de recibo

¿Estado del instrumento ó muestra?: BUENO ▾

¿Deseas capturar los datos?: SI ▾

Captura de datos

| # | P. Calibración/Medición / mm | Error / mm | U / mm |
|---|---------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | <input type="text" value="1.000000"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| 2 | <input type="text" value="2.000000"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| 3 | <input type="text" value="3.000000"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

Fig. 31: Captura de datos.

Si el participantes acusa de recibido el estado del instrumento **MALO**, deberá de adjuntar las imágenes del equipos (ITEM) dañado y la descripción del daño (evidencia).

Acuse de recibo

¿Estado del instrumento ó muestra?:

Subir evidencia: Ningún archivo seleccionado

| # | Archivo | Descripción | Borrar |
|---|---------|-------------|--------|
| | | | |

Descripción evidencia:

Fig. 32: Descripción de evidencias de equipo, muestra o ítem dañado.

4.2.11. ANÁLISIS DE DATOS E INFORMES PRELIMINAR.

Una vez finalizada la captura de los datos por los participantes el coordinador o administrador podrá realizar los cálculos y los informes en el menú cálculos, ubicado en la pestaña de aseguramientos.

Consulta de aseguramientos para calculos

| Clave | No. Registro | Nombre | Tipo | Metodo | Participantes | Herramienta-Estadística | Informe | XLS |
|---------------------|--------------|---|-------|---------|---------------|--|--|--|
| ASCAL-MDI-2015-0004 | LMD-15004 | Micrometros | Inter | DIRECTO | 3 | <input type="button" value="Relación de Birge"/> <input type="button" value="Error medio cuadrático"/> | <input type="button" value="Informe"/> | <input type="button" value="Informe XLS"/> |
| ASCAL-MDI-2015-0003 | LMD-20150003 | Calibración de micrometros | Inter | DIRECTO | 3 | <input type="button" value="Relación de Birge"/> <input type="button" value="Error medio cuadrático"/> | <input type="button" value="Informe"/> | <input type="button" value="Informe XLS"/> |
| ASCAL-MDI-2015-0002 | LMD-20150002 | Calibración de indicador de pestaña (entrante) | Inter | DIRECTO | 9 | <input type="button" value="Relación de Birge"/> <input type="button" value="Error medio cuadrático"/> | <input type="button" value="Informe"/> | <input type="button" value="Informe XLS"/> |
| ASCAL-MDI-2015-0001 | LMD-20150001 | Calibración de Micrómetro para mediciones de exteriores | Inter | DIRECTO | 11 | <input type="button" value="Relación de Birge"/> <input type="button" value="Error medio cuadrático"/> | <input type="button" value="Informe"/> | <input type="button" value="Informe XLS"/> |

Fig. 33: Elección de herramienta estadística para los cálculos del aseguramiento.

- a) Al dar clic en la técnica estadística el **COORDINADOR** o **ADMINISTRADOR** podrá visualizar los resultados obtenidos por los participantes:

Resultado Relación de Birge

[Regresar](#)

Datos generales del aseguramiento

Nombre del aseguramiento: Calibración de Micrómetro para mediciones de exteriores
 Fecha del aseguramiento: 13-07-2015
 Tipo del aseguramiento: Inter
 Método del aseguramiento: DIRECTO
 Laboratorio: DIMENSIONAL QRO
 Coordinador: ADMINISTRADOR ASCAL

Observaciones:

Protocolo del aseguramiento

| Archivo | Descripción |
|------------------------------------|--|
| PROTOCOLO INTERLAB-EA-003-2014.pdf | Protocolo Micrómetro para mediciones de exteriores |

No. Iteración: 1
Punto: .000000

| Lab. | ϵ_i | U_{ij} | u_{ij} | W_{ij}^2 | $\frac{\epsilon}{W_{ij}^2}$ | $\frac{1}{W^2}$ | $\bar{\epsilon}_f$ | $(\epsilon_{ij} - \bar{\epsilon}_f)^2$ | u_{ext} | u_{int} | En | Criterio R_0 | R_0 |
|-----------------------------------|--------------|----------|----------|------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|--|-----------|-----------|----|-----------------|-------|
| AGUSTIN PEREZ MALDONADO | .000000 | .001600 | 0.0008 | 0.00000064000000000000 | 0 | 1562500 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| ANDRES ANTONIO BAEZ CERVANTES | .000000 | .001300 | 0.00065 | 0.00000042250000000000 | 0 | 2366863.9053254 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| ANDRES GUERRERO LUNA | .000000 | .000840 | 0.00042 | 0.00000017640000000000 | 0 | 5668934.2403628 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| CHRISTIAN CONTRERAS PEREZ | .000000 | .000950 | 0.000475 | 0.00000022562500000000 | 0 | 4432132.9639889 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| EDUARDO LOPEZ HERNANDEZ | .000000 | .001070 | 0.000535 | 0.00000028622500000000 | 0 | 3493754.9130928 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| ENRIQUE GARCIA BASILIO | .000000 | .001500 | 0.00075 | 0.00000056250000000000 | 0 | 1777777.7777778 | 0 | 0 | 0 | 0.00016 | 0 | 1.3763819204712 | 0 |
| FRANCISCO ADRIAN SIFUENTES GARCIA | .000000 | .001500 | 0.00075 | 0.00000056250000000000 | 0 | 1777777.7777778 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| MA. DEL CARMEN FLORES MUÑOZ | .000000 | .001100 | 0.00055 | 0.00000030250000000000 | 0 | 3305785.1239669 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| FRANCISCO JAVIER QUIÑONES RIOS | .000000 | .000700 | 0.00035 | 0.00000012250000000000 | 0 | 8163265.3061224 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| MARCO ANTONIO ALVAREZ ARMAS | .000000 | .000840 | 0.00042 | 0.00000017640000000000 | 0 | 5668934.2403628 | 0 | 0 | | | 0 | | |
| MARIO DAGOBERTO DIAZ ORGAZ | .000000 | .001100 | 0.00055 | 0.00000030250000000000 | 0 | 3305785.1239669 | 0 | 0 | | | 0 | | |

Fig. 34: Método estadístico de análisis.

- b) Al dar clic en el botón de informe podrá visualizar los resultados finales de las técnicas estadísticas realizadas:

Informe aseguramiento

[Regresar](#)

Datos generales del aseguramiento

Calibración de Micrómetro
 Nombre del aseguramiento: para mediciones de exteriores Fecha del aseguramiento: 13-07-2015
 Tipo del aseguramiento: Inter Método del aseguramiento: DIRECTO
 Laboratorio: DIMENSIONAL QRO Coordinador: ADMINISTRADOR ASCAL

Observaciones:

Protocolo del aseguramiento

| Archivo | Descripción |
|------------------------------------|--|
| PROTOCOLO INTERLAB-EA-003-2014.pdf | Protocolo Micrómetro para mediciones de exteriores |

incertidumbre consensuada, incertidumbre estándar combinada e incertidumbre expandida, obtenidas con todos los resultados con EN s

| Val. Nom./Lab. | .000000 | 2.500000 | 5.100000 | 7.700000 | 10.300000 | 12.900000 | 15.000000 | 17.600000 | 20.200000 | 22.800000 | 25.000000 |
|----------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| tj | .00000000000000000000 | -.00044991059504951000 | -.08676941102162100000 | | | | | | | | |
| uext | .00021200000000000000 | .00021200000000000000 | .05301600000000000000 | | | | | | | | |
| U | 0 | 0.000424 | 0.186032 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Desviaciones y errores normalizados

| Val. Nom./Lab. | Lab. 2 | | Lab. 3 | | Lab. 4 | | Lab. 5 | |
|----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| | desv. | En | desv. | En | desv. | En | desv. | En |
| .000000 | .00000000000000000000 | .00000000000000000000 | .00000000000000000000 | .00000000000000000000 | .00000000000000000000 | .00000000000000000000 | .00000000000000000000 | .00000000000000000000 |
| 2.500000 | .00044991059505000000 | .27181204128531000000 | .00044991059505000000 | .32902691849793000000 | .00044991059505000000 | .37568598614398000000 | .00044991059505000000 | .38163993815006000000 |
| 5.100000 | .08676941102162100000 | .46640471513618000000 | .08676941102162100000 | .46641057723240000000 | .08676941102162100000 | .46641320783570000000 | -.91323058897838000000 | 4.90891150289250000000 |
| 7.700000 | .00024330481518700000 | .14925428720961000000 | .00024330481518700000 | .16962788489241000000 | .00024330481518700000 | .20254707025613000000 | .00024330481518700000 | .21279222957737000000 |
| 10.300000 | .00004167286147300000 | .02435212906596400000 | .00004167286147300000 | .02947883887149200000 | .00004167286147300000 | .03483865887754100000 | .00004167286147300000 | .03729697928546300000 |
| 12.900000 | .00027912168947800000 | .16051138839101000000 | .00027912168947800000 | .19289004274285000000 | .00027912168947800000 | .22248323535747000000 | .00027912168947800000 | .24076927216371000000 |
| 15.000000 | .00060726581724700000 | .34388012463139000000 | .00060726581724700000 | .41049431570258000000 | .00060726581724700000 | .46345583978157000000 | -.00039273418275300000 | .32745089753142000000 |
| 17.600000 | .00050778209175000000 | .28875035453481000000 | .00050778209175000000 | .32424468976182000000 | .00050778209175000000 | .38493754905518000000 | -.00049221790825000000 | .41415526070065000000 |
| 20.200000 | .00050604376832900000 | .28776185668846000000 | .00050604376832900000 | .32313468185192000000 | .00050604376832900000 | .37822430614032000000 | -.00049395623167100000 | .41561789701993000000 |
| 22.800000 | .00088702683500900000 | .46781513122046000000 | -.00011297316499100000 | .06999280968145700000 | -.00011297316499100000 | .08001189210379000000 | -.00011297316499100000 | .09030008445875400000 |
| .000000 | .00081644793829400000 | .43228059542159000000 | -.00018355206170600000 | .11433693703832000000 | -.00018355206170600000 | .12923689331669000000 | -.00018355206170600000 | .14804588458801100000 |

Fig. 35: Visualización los resultados finales de las técnicas estadísticas realizadas

Así como las gráficas de los resultados:



Fig. 36: Gráficas de resultados

c) De igual forma los resultados anteriores se pueden exportar a formato .xls que es un formatos de Microsoft Office Excel 2003, para un mejor análisis, dando clic en el botón de “Informe XLS”.

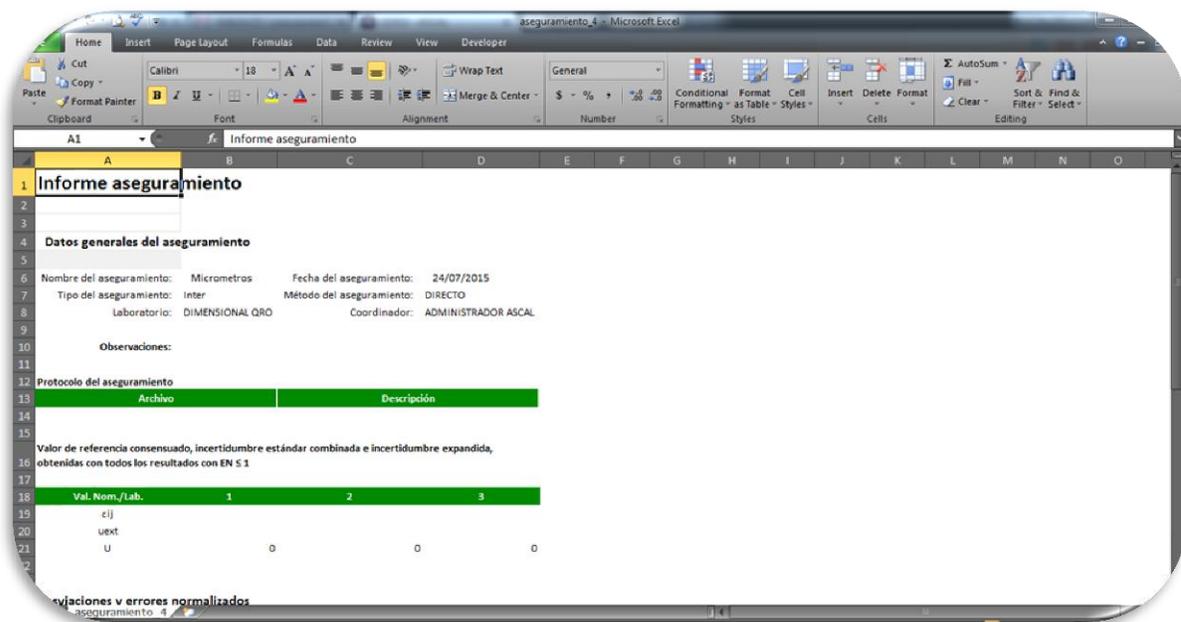


Fig. 37: Resultados exportados a formato Excel.

4.2.12. PUBLICAR RESULTADOS.

Una vez finalizado el análisis de los datos e informe de resultados se procede a publicar los resultados de la siguiente forma:

- a) Damos clic en publicar resultados

| Participante | Instrumento | Estatus | Capturar datos | Resultado | |
|-------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| ANDRES ANTONIO BAEZ CERVANTES | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio | Guardar resultado |
| ENRIQUE GARCIA BASILIO | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio | Guardar resultado |
| MARIO DAGOBERTO DIAZ ORGAZ | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio | Guardar resultado |

Fig. 38: Informe gerencial de resultados.

Se desplegará la opción de resultados donde se debe de seleccionar el resultado por participante el cual puede ser satisfactorio, No satisfactorio, cuestionable o sin participación.

- b) Una vez seleccionada la opción damos un clic en el botón de guardar resultado:

| Participante | Instrumento | Estatus | Capturar datos | Resultado | |
|-------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| ANDRES ANTONIO BAEZ CERVANTES | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio | |
| ENRIQUE GARCIA BASILIO | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio | Guardar resultado |
| MARIO DAGOBERTO DIAZ ORGAZ | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio | Guardar resultado |

Fig. 39: Resultados guardados.

- c) Una vez seleccionados los estatus se debe de anexar el informe final

| Participante | Instrumento | Estatus | Capturar datos | Resultado |
|-------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------|---------------|
| ANDRES ANTONIO BAEZ CERVANTES | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio |
| ENRIQUE GARCIA BASILIO | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio |
| MARIO DAGOBERTO DIAZ ORGAZ | BUENO | CAPTURADO | Capturar datos | Satisfactorio |

Publicar resultados

[Seleccionar archivo](#) Ningún archivo seleccionado [Subir archivo informe](#)

Fig. 40: Resultados guardados con posibilidad de publicación; es decir, realizar el informe final.

- d) Se desplegará el botón de publicar, damos un clic y se publicarán los resultados para la consulta de los participantes.

Publicar resultados

[Seleccionar archivo](#) DHL Ocorre.pdf [Subir archivo informe](#)

[Guardar publicación](#)

Fig. 41: Archivo de con el informe realizado.

Notas:

- Todo el proceso involucrado en esta herramienta informática usa como referencia la Norma ISO/IEC 17043 [10], del Anexo B.
- En las normas NMX-CH-13528-IMNC [11] y la NMX-CH-2602 [13] se puede consultar el enfoque estadístico adicionales.
- Los términos estadísticos utilizados son coherentes con lo que se establece en las normas ISO 3534-1 [15] e ISO 3541-2[16].

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LOS CONTROLES DE CALIDAD.

5.1. GENERALIDADES.

Como resultado de este trabajo se elaboró el procedimiento CID-PR-SC-MT-MTD-053 “Procedimiento para el desarrollo de los controles de la calidad”, que incluye la metodología para la realización de los mismos.

Se anexa el procedimiento para el desarrollo de los controles de calidad en la gerencia de Metrología Mecánica. Para mayor detalle se puede consultar en el módulo de control de documentos.

Se anexa de forma electrónica conjuntamente con la tesis.

5.2. ACLARACIÓN SOBRE ECUACIONES UTILIZADAS EN EL CAPÍTULO 5.

Nota aclaratoria. En este capítulo se anexa la metodología como instructivo con el que cuentan los laboratorios para guiarse en el desarrollo de sus aseguramientos. En ella se manejan las mismas ecuaciones que han sido utilizadas a lo largo del documento de la tesis. El lector deberá considerar este detalle en este apartado y no considerar estas ecuaciones como nuevas. Por comodidad en la lectura, se acomodan los números de cada ecuación comenzando con el número 5 que se corresponde con el capítulo.

| PROCEDIMIENTO PARA EL DESARROLLO DE LOS CONTROLES DE LA CALIDAD. | | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|----------|---------------------|
| Documento | Nombre | Cargo | Código | CID-PR-SC-MT-GM-053 |
| Autoría | Ing. Mario D. Díaz Orgaz | Gte. Metrología Mecánica | Fecha | 2015-03-20 |
| Revisión | Ing. Marco Álvarez Armas | Ing. de Proyecto | Páginas | 1/50 |
| Elaboró | Ing. Mario D. Díaz Orgaz | Gte. Metrología Mecánica | Revisión | 00 |

CONTENIDO

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1. Objetivo..... | 2 |
| 2. Alcance..... | 2 |
| 3. Definiciones..... | 2 |
| 4. Responsabilidades..... | 7 |
| 5. Contenido del procedimiento..... | 8 |
| 6. Documentos aplicables..... | 31 |
| 7. Historial de cambios..... | 32 |
| 8. Anexos..... | 33 |

| |
|--|
| Elaboración original del procedimiento |
| Ing. Mario D. Díaz Orgaz |

Este documento es CONFIDENCIAL: no se autoriza la reproducción y/o distribución externa en papel o en medios electrónicos, sin el consentimiento por escrito del personal involucrado en la autorización del documento o en acuerdo con las políticas de la Unidad de Enlace (IEFA).

Fig. 42: Imagen de la portada del procedimiento CID-PR-SC-MT-MTD-053 “Procedimiento para el desarrollo de los controles de la calidad”

5.3. INTRODUCCIÓN.

Los laboratorios de calibración tienen la necesidad de realizar controles de calidad, tanto externos como internos, con el objetivo de demostrar su competencia técnica. Con esa intención realizan ejercicios de intercomparaciones.

Estos ejercicios pueden ser tomados como una comparación entre laboratorios acreditados por la entidad mexicana de acreditación a. c. (ema) y con la finalidad de dar cumplimiento al punto 5.9 de la norma NMX-EC-17025 [9] así como con su política de Ensayos de Aptitud. La información que se genere producto de estos ejercicios se identificará con el número de referencia INTERLAB-EA-0xx/20xx que se colocará tanto en la portada del protocolo, borrador del informe del ensayo de

aptitud, informe final de ensayo de aptitud así como en el pie de página de cada hoja de la documentación que de este ensayo derive.

La calidad metrológica de los servicios de calibración y de medición desarrollados por los laboratorios de calibración acreditados se puede demostrar a través de comparaciones entre laboratorios, mismas que entre otros propósitos garantizan:

- Identificar problemas en los laboratorios e iniciar acciones para la mejora.
- Establecer la eficacia y la comparabilidad de los métodos de medida.
- Proporcionar confianza adicional a los clientes de los laboratorios.
- Identificar las diferencias de resultados entre los laboratorios.
- Validar las estimaciones de incertidumbres de medida declaradas.

Los subcomités de laboratorios de calibración identifican y comunican a la entidad mexicana de acreditación, eme, las áreas o subáreas que requieren ensayos de aptitud específicos. Para el caso de dimensional no se cuenta en la actualidad con proveedores de ensayos de aptitud acreditados, objetivo principal de este proyecto.

5.4. OBJETIVO.

Los ejercicios de ensayos de aptitud pueden ser utilizados por los laboratorios acreditados como una forma de aseguramiento metrológico mediante el cual se demuestre la consistencia técnica dentro de los intervalos acreditados o puede ser utilizado por los laboratorios que se pretendan acreditar para demostrar su eficacia para el desarrollo de este tipo de servicio de calibración o en su caso como una actividad de aseguramiento de la calidad. Estos ensayos se llevarán a cabo conforme a la norma NMX-EC-17043 [10] la cual está completamente basada en la norma ISO/IEC 17043:2010.

Con el desarrollo de estos ejercicios se pretende que los laboratorios puedan demostrar su competencia técnica en la calibración y en la estimación de la incertidumbre de medida para los alcances que se definan.

5.5. ALCANCE DE LA METODOLOGÍA.

Estos ejercicios contemplarán tanto calibraciones como mediciones en los alcances que los laboratorios ofrecen sus servicios.

5.6. DEFINICIONES.

Se presentan algunas definiciones que pueden reforzar el entendimiento de la temática. Para mayor detalle de las definiciones consultar el CID-PR-SC-MT-DIM-001:

MEDIDA MATERIALIZADA (VIM).- Instrumento de medida que reproduce o proporciona de manera permanente durante su utilización, magnitudes de una o varias naturalezas, cada una de ellas con un valor asignado.

Ejemplos:

- Pesa patrón, medida de volumen (proporcionando uno o más valores, con o sin escala de valores), resistencia eléctrica patrón, regla graduada, bloque patrón, generador de señales patrón, material de referencia certificado.

NOTAS:

- La indicación de una medida materializada es un valor asignado.
- Una medida materializada puede ser un patrón.

PATRÓN DE MEDIDA (VIM).- Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.

Ejemplos

- Patrón de masa de 1 kg, con una incertidumbre típica asociada de 3 μg .
- Resistencia patrón de 100 Ω , con una incertidumbre típica asociada de 1 $\mu\Omega$.
- Patrón de frecuencia de cesio, con una incertidumbre típica relativa asociada de 2×10^{-15} .
- Electrodo de referencia de hidrógeno, con un valor asignado de 7,072 y una incertidumbre típica asociada de 0,006.
- Serie de soluciones de referencia, de cortisol en suero humano, que tienen un valor certificado con una incertidumbre de medida.
- Materiales de referencia con valores e incertidumbres de medida asociadas, para la concentración de masa de diez proteínas diferentes.

Notas:

1. La "realización de la definición de una magnitud dada" puede establecerse mediante un sistema de medida, una medida materializada o un material de referencia.

2. Un patrón se utiliza frecuentemente como referencia para obtener valores medidos e incertidumbres de medida asociadas para otras magnitudes de la misma naturaleza, estableciendo así la trazabilidad metrológica, mediante calibración de otros patrones, instrumentos o sistemas de medida.
3. El término “realización” se emplea aquí en su sentido más general. Se refiere a tres procedimientos de realización. El primero, la realización stricto sensu, es la realización física de la unidad a partir de su definición. El segundo, denominado “reproducción”, consiste, no en realizar la unidad a partir de su definición sino en construir un patrón altamente reproducible basado en un fenómeno físico, por ejemplo el empleo de láseres estabilizados en frecuencia para construir un patrón del metro, el empleo del efecto Josephson para el volt o el efecto Hall cuántico para el ohm. El tercer procedimiento consiste en adoptar una medida materializada como patrón. Es el caso del patrón de 1 kg.
4. La incertidumbre típica asociada a un patrón es siempre una componente de la incertidumbre típica combinada (véase la Guía ISO/IEC 98-3:2008, 2.3.4) de un resultado de medida obtenido utilizando el patrón. Esta componente suele ser pequeña comparada con otras componentes de la incertidumbre típica combinada.
5. El valor de la magnitud y de su incertidumbre de medida deben determinarse en el momento en que se utiliza el patrón.
6. Varias magnitudes de la misma naturaleza o de naturalezas diferentes pueden realizarse mediante un único dispositivo, denominado también patrón.
7. En el idioma inglés, la palabra “embodiment” algunas veces se usa en vez de “realización”.
8. En ciencia y tecnología, el vocablo inglés “standard” se usa con dos significados distintos: como una norma, especificación, recomendación técnica o documento escrito similar, y como un patrón de medida (en el idioma francés “étalon”). Este vocabulario se refiere únicamente al segundo significado.
9. El término “patrón” se utiliza a veces para designar otras herramientas metrológicas, por ejemplo un “programa de medida patrón”.

REPETIBILIDAD DE MEDIDA (VIM).- Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de

RESULTADO DE MEDIDA (VIM).- Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Notas:

- Un resultado de medida contiene generalmente información relevante sobre el conjunto de valores de una magnitud. Algunos de ellos representan el mensurando mejor que otros. Esto puede representarse como una función de densidad de probabilidad.
- El resultado de una medición se expresa generalmente como un valor medido único y una incertidumbre de medida. Si la incertidumbre de medida se considera despreciable para un determinado fin, el resultado de medida puede expresarse como un único valor medido de la magnitud. En muchos campos esta es la forma habitual de expresar el resultado de medida.
- En la bibliografía tradicional y en la edición precedente del VIM, el término resultado de medida estaba definido como un valor atribuido al mensurando y podía entenderse como indicación, resultado no corregido o resultado corregido, según el contexto.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN: Documento escrito, general en un formato establecido previamente, con la transcripción de los datos de identificación de los instrumentos de medición o mensurandos analizados y los correspondientes resultados obtenidos durante la calibración o medición de éstos, que debe contener las firmas de quien lo elaboró, revisó y aprobó y con el sello correspondiente.

CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO: Procedimiento básico para determinar el margen de error en la aplicación de un método de medición y de los técnicos del laboratorio que emplean dicho método.

ENSAYO DE APTITUD: Determinación del desempeño de un laboratorio en la realización de ensayos por medio de comparaciones interlaboratorios.

COMPARACIONES INTERLABORATORIOS: Organización, realización y evaluación de ensayos sobre el mismo material de ensayo o sobre material de ensayos similares, por dos o más laboratorios, de acuerdo con condiciones predeterminadas.

LABORATORIO DE REFERENCIA: Laboratorio que provee valores de referencia sobre un material de ensayo.

PRECISIÓN: Grado de concordancia entre resultados de ensayo independientes, obtenidos en condiciones determinadas.

RESULTADOS EXTREMOS: Valores aberrantes y otros valores que son extremadamente incompatibles con otros miembros del conjunto de datos.

5.6.1. ERROR NORMALIZADO.

El error normalizado o número E_n [10] es un criterio que se especifica para establecer la compatibilidad de los resultados. Este número o criterio es un test de hipótesis para medias. Se considera que dos resultados son compatibles si $E_n \leq 1$.

Cuando hay una referencia

Cuando la referencia es un valor asignado

$$E_n = \frac{|x_{lab} - X_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad \text{ó} \quad E_n = \frac{|x_{lab} - X_{VA}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{X_{VA}}^2}} \quad (5.1)$$

Donde:

- E_n Criterio del error normalizado.
- x_{lab} Valor de informado por el laboratorio.
- X_{ref} Valor de referencia.
- U_{lab}^2 Incertidumbre del valor por el participante.
- U_{ref}^2 Incertidumbre del valor de referencia.
- X_{VA} Valor asignado
- u_x Incertidumbre estándar de los laboratorios
- $U_{X_{VA}}^2$ - Incertidumbre del valor asignado

El criterio de aceptación es:

- $|E_n| \leq 1$ Satisfactoria la comparación.
- $|E_n| > 1$ El resultado es no satisfactorio.

5.6.2. ERROR MEDIO CUADRÁTICO.

En estadística, el error cuadrático medio (δ_{MSi}) [22] (o mean square error en inglés) es una forma de evaluar la diferencia entre un estimador y el valor real de la cantidad que se quiere calcular.

$$\delta_{MSi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{lab} - x_{ref})^2}{n}} \quad (5.2)$$

Donde:

- δ_{MSi} Error medio cuadrático.
- x_{lab} Valor de informado por el laboratorio.

X_{ref} Valor de referencia.

n Número de participantes.

$$\delta_{MS_i} = \sqrt{\frac{(x_{lab} - X_{VA})^2 + u_x^2 + u_{VA}^2}{\hat{\sigma}}} \quad (5.3)$$

Donde:

X_{lab} Valor reportado por el laboratorio

X_{VA} Valor asignado

x_{ref} Valor de referencia

u_x Incertidumbre estándar de los laboratorios

u_{XVA} Incertidumbre estándar del valor asignado

σ Desviación estándar para el propósito

Valor asignado

$$X_{VA} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{u_{x_i}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_{x_i}^2} \right)} \quad (5.4)$$

Incertidumbre de los participantes.

$$u_{lab} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_{VA})^2}{n-1}} \quad (5.5)$$

Incertidumbre estándar del valor asignado:

$$u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{x_i}^2}}} \quad (5.6)$$

Valor de comparación para el error medio cuadrático:

$$\delta_{MSC_\alpha} = \sqrt{1 + \chi^{-2}} \times \frac{u_{tot}}{\hat{\sigma}} \quad (5.7)$$

Se dice que hay concordancia entre los datos si:

$$\delta_{MS_i} \leq \delta_{MSC_\alpha} \quad (5.8)$$

5.6.3. RELACIÓN DE BIRGE.

La relación de Birge [18], [19], [20], [21] es un método que permite determinar si la estimación de la incertidumbre informada por cada participante es adecuado a los resultados obtenidos.

$$R_B = \frac{u_{ext}}{u_{int}} \quad (5.9)$$

Donde:

u_{ext} Incertidumbre estándar del valor asignado, consultar ecuación.

$u_{int} = uX_{VA}$ Desviación estándar de la dispersión de los resultados x_i , ponderados con sus respectivas incertidumbres asociadas.

La incertidumbre externa se calcula por:

$$u_{ext} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i)(x_i - X_{VA})^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i)}} \quad (5.10)$$

Donde:

x_i Resultados de cada participante.

u_{xi}^2 Incertidumbre del valor reportado por el participante.

X_{VA} Valor de referencia asignado (consultar ecuación (43)).

n Número de participantes

Mientras que la incertidumbre interna:

$$u_{int} = u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{xi}^2}}} \quad (5.11)$$

Relación de Birge de comparación:

$$R_{B_{Ca}} = \sqrt{\frac{\chi^2}{n-1}} \quad (5.12)$$

Para que los datos se consideren consistentes tiene que ocurrir que:

$$R_{Bi} \leq R_{B_{Ca}} \quad (5.13)$$

5.6.4. INDICADORES MANDEL.

Para cada laboratorio participante y por cada nivel, se debe calcular el indicador de consistencia h_j , que muestra cómo el promedio de los resultados de un laboratorio (o metrólogo) en particular se comporta con el promedio del resto de los metrólogos (laboratorios) y el indicador de consistencia k , que indica cómo la variabilidad intra laboratorio de un metrólogo (laboratorio) particular, bajo condiciones de repetibilidad, compara con el resto de los metrólogos (laboratorios) combinados; es decir, evalúa la consistencia de la precisión de cada laboratorio con relación a la esperada.

Para este análisis hay que calcular primeramente la media de cada participante por cada nivel [9]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.14)$$

Donde:

x_i - Son los resultados de las mediciones de cada participante.

n - Es el número de repeticiones.

Posteriormente se debe calcular la desviación estándar de cada participante por nivel:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5.15)$$

Donde:

\bar{x} .- Es la media.

x_i - Son los resultados de las mediciones de cada participante.

Calcular la medida de las medias del nivel:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^p \bar{x}_i}{p} \quad (5.16)$$

Donde:

p - Es el número de participantes.

Se tiene que calcular ahora el coeficiente h_j de cada participante por nivel:

$$h_j = \frac{d}{s_x^-} \quad (5.17)$$

Y la desviación estándar es:

$$s_{x_i}^- = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p d_i^2}{p-1}} \quad (5.18)$$

Donde:

d_i - Desviación del promedio de cada laboratorio i respecto al promedio global.

s_x^- .- Desviación típica de los promedios de todos los laboratorios.

p .- Número de laboratorios participantes.

Conociendo que:

$$d_i = (\bar{x}_i - \bar{x}) \quad (5.19)$$

Finalmente:

$$h_{ij} = \frac{(\bar{x}_i - \bar{x})}{\sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (\bar{x}_i - \bar{x})^2}} \quad (5.20)$$

Este valor h_{ij} hay que compararlo con un valor estadístico al cual llamamos valor crítico y se calcula por la ecuación:

$$h_{crítico} = \frac{(p-1)t}{\sqrt{p(t^2 + p-2)}} \quad (5.21)$$

Donde:

t .- es la t de student con $p-2$ grados de libertad, al nivel de significación de 0,5% a dos colas.

Por su parte el indicador k_{ij} , que como ya se ha dicho indica cómo la variabilidad intra laboratorio de un participante particular, bajo condiciones de repetibilidad, compara con el resto de los laboratorios, está definido por:

$$k = \frac{s_i}{s_r} \quad (5.22)$$

Donde:

$$s_i = \sum_{i=1}^p \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad \text{y} \quad (5.23)$$

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p s_i^2}{p}} \quad (5.24)$$

Donde:

s_i^2 .- Desviación típica de los resultados de cada participante.

s_r .- Desviación típica de la repetibilidad.

n .- Número de réplicas.

Así, el valor de k es:

$$k_{ij} = \frac{s_i \sqrt{p}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p s_i^2}} \quad (5.25)$$

Donde:

s_i .- desviación típica de los resultados de cada laboratorio particular;

El valor de comparación $k_{crítico}$ se calcula según:

$$k_{crítico} = \sqrt{\frac{p}{1 + \frac{p-1}{F}}} \quad (5.26)$$

Donde:

F .- Es el valor de la distribución Fisher con $(n-1)$ y $(p-1)$ grados de libertad al nivel de significación de 0,5%.

5.6.5. ANÁLISIS DE VARIANZA.

El análisis de varianza [1] se utiliza para comprobar si hay diferencias estadísticamente significativas entre medias cuando tenemos más de dos muestras o grupos en el mismo planteamiento.

5.6.6. PRUEBA F.

La prueba F [1] (prueba Fisher) se utiliza comúnmente para evaluar si existe consistencia entre las precisiones en condiciones de repetibilidad σ_r de los participantes.

$$F = \frac{\frac{U}{\nu_1}}{\frac{V}{\nu_2}} \quad (5.27)$$

Donde U y V son variables aleatorias independientes que tienen distribuciones χ^2 con ν_1 y ν_2 grados de libertad, respectivamente.

Para calcular la F , se debe calcular primero la estimación interna:

- Determinar la varianza de cada muestra por la ecuación :
- Calcular primeramente la varianza de las medias muestrales:

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{k-1} \quad (5.28)$$

Donde:

- s_x^2 Varianza de las medias.
- \bar{x} Medias aritmética.
- $\bar{\bar{x}}$ Medias de las medias aritméticas.
- k Número de medias.

- Multiplicar la varianza de las medias muestrales por n :

$$s_x^2 \times n \quad (5.29)$$

- Obtener la estimación interna de la varianza (varianza promedio de la muestra):

$$s_w^2 = \frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_k^2}{k} \quad (5.30)$$

Estimar entonces la F_{prueba} :

$$F_{prueba} = \frac{s_x^2}{s_w^2} = \frac{n \times s_x^2}{(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_k^2)} \quad (5.31)$$

Esta F_{prueba} se deberá comparar con la $F_{critica}$ ($F_{prueba} > F_{critica(\alpha, v_1, v_2)}$) y se deben realizar las siguientes hipótesis:

Nula: H_0 :- Todas las proporciones de la población son iguales.

Alterna: H_1 :- No todas las proporciones de la población son iguales.

5.7. RESPONSABILIDADES Y AUTORIDADES.

El coordinador de calidad del laboratorio será el responsable de la planeación y desarrollo de los ejercicios de comparaciones interlaboratorios.

5.8. PROTOCOLO DE INTERCOMPARACIÓN.

Para el caso de laboratorios del CIDESI, se usará la herramienta informática llamada ASCAL que se encuentra alojada en la intranet del centro en la siguiente liga: <http://slaic.cidesi.mx/ASCAL/>.

En el módulo de documentos se encuentra el instructivo CID-I-SC-MT-DIM-006 “Manual de uso del sistema ASCAL”.

Para estos casos el coordinador dará aviso a los involucrados en el control de calidad o prueba de intercomparación que un nuevo control se encuentra disponible.

Deberá realizarse un protocolo simple que incluya los siguientes puntos, pero no limitativos:

- a) **Objetivo:** Concreto y conciso, que describa claramente qué se pretende con el ejercicio de E.A.
- b) **Intervalo del ensayo de aptitud:** El intervalo de medición que se pretende analizar.
- c) **Descripción del IBC a intercomparar:** Descripción concreta, clara y sin ambigüedades del ítem.
- d) **Organización:** La manera en que se circulará el ítem, quien es el responsable y a quien se deben dirigir los resultados.

e) **Programación y calendario del ensayo:** Establecer claramente el programa y cronograma para las fechas de recibo, medición, envío de resultados y envío al siguiente participante.

f) **Descripción del ensayo:**

f.1. **Condiciones generales:** Características generales a cumplir por los participantes.

f.2. **Establecimiento de los valores de calibración:** Definición clara de los puntos del intervalo de calibración en los cuales se determinará el error o determinación de las cotas a medir por los participantes.

| Puntos en mm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

Tabla 5.1: Tabla con los puntos del intervalo de calibración en los cuales se determinará el error

f.3. Estimación e informe de la incertidumbre de medida. La manera de expresar la incertidumbre, requisitos particulares para la incertidumbre, por ejemplo, para el caso de instrumentos que se clasifiquen en clases o grados de exactitud exigir que la incertidumbre no sea mayor a 1/3 EMT.

g) Determinación del valor de referencia. Dependiendo de la técnica de análisis ya sea un valor de referencia o un valor de referencia consensuado.

h) Captura de resultados y protección de la información. Cómo deben ser enviados los resultados

i) Análisis de los resultados para determinar su consistencia y la existencia de datos dudosos. Uso de técnicas robustas para la discriminación de valores raros o fuera de contexto.

j) Métodos que podrán ser utilizados para la evaluación del desempeño de los participantes.

j.1. Determinación del desempeño de los participantes a través del error medio medio cuadrático (δ_{iRMS}).

j.2. Determinación del desempeño de los participantes a través de la relación de Birge.

j.3. Determinación del desempeño de los participantes a través del error normalizado.

j.4. Para los casos de controles internos de la calidad de los propios laboratorios del CIDESI, uso de técnicas gráficas de desempeño a través de los indicadores de Mandel, h y k.

j.5. Para los casos de controles internos de la calidad de los propios laboratorios del CIDESI, desarrollo de análisis de varianzas.

k) Elaboración de informe de resultados.

El protocolo de intercomparación, para comparaciones que involucre laboratorios externos al CIDESI, siempre debe estar disponible y debe contar, como mínimo, con los siguientes puntos:

- a) Objetivo.
- b) Intervalo del ensayo de aptitud.
- c) Requisitos para participar en el ensayo de aptitud. Los requisitos mínimos que deben cumplir los participantes para poder participar en la intercomparación.
- d) Descripción del IBC a intercomparar.
- e) Organización.
- f) Participantes. En esta sección se enumerarán los participantes confirmados. Siempre que sea un estudio externo se debe aprovechar y siempre que sea posible que participen todos los laboratorios del CIDESI.

Se deberá anexar una tabla en la que se muestren los laboratorios participantes.

| Nombre del laboratorio | Dirección | Nombre del contacto | Teléfono de contacto | Correo electrónico |
|------------------------|-----------|---------------------|----------------------|--------------------|
| | | | | |

Tabla 5.2: Datos de los participantes.

Programación y calendario del ensayo. El diseño de circulación del será del tipo estrella. La circulación se llevará a cabo conforme se presenta en la tabla con calibraciones intermedias por el laboratorio piloto.

| LABORATORIO | ESTADO | IBC | | |
|-------------|--------|-----------|-------------|-------|
| | | RECEPCIÓN | CALIBRACIÓN | ENVÍO |
| | | | | |

Tabla 5.3: Programación de cada participante.

Se asignan entre cuatro y cinco días hábiles a cada laboratorio participante, cuando el calendario lo permita: un día de recepción y acondicionamiento, dos días para la calibración, el cuarto día para embalaje, envío del IBC y envío de resultados y certificado/informe de calibración, y cuando aplique el quinto día para el envío de resultados y certificado/informe de calibración. En cuanto el laboratorio reciba el instrumento deberá inspeccionarlo y verificar su buen funcionamiento e

inmediatamente enviar un correo electrónico confirmando la recepción en buenas condiciones al coordinador del ejercicio llenando el formato siguiente.

| | |
|--|---------------------------|
| NOMBRE LABORATORIO QUE ENTREGA EL IBC | FECHA (AAAA-MM-DD) |
| | |
| LABORATORIO QUE RECIBE EL IBC | FECHA (AAAA-MM-DD) |
| | |
| El IBC se recibió por: | |
| Servicio de mensajería: | [] |
| Personal del laboratorio predecesor | [] |
| Otro (especifique) _____ | |
| Describir las condiciones de. | |
| El embalaje de transporte (caja conteniendo el IBC y estuche). | |
| El estado y funcionamiento del IBC | |
| Observaciones y comentarios adicionales | |
| | |
| Nombre y firma (persona que figura como contacto del presente ensayo de aptitud o el técnico designado por el laboratorio para realizar la verificación del IBC) | |

Fig. 5.1: Formato para la recepción y acuse de recibo del ibc

Los envíos estarán a cargo de cada laboratorio. Si se envía por mensajería, esta actividad tiene que planificarse adecuadamente para que el IBC llegue en el tiempo indicado al siguiente laboratorio participante. Todos los envíos deberán estar acompañados del formato anterior.

Si por cualquier razón, un laboratorio participante no puede efectuar las mediciones en el período que le fue asignado, deberá enviarlos al siguiente participante sin haber medido y deberá contactar

al coordinador para informarle inmediatamente, quien analizará y determinará, de ser posible, la asignación de un nuevo espacio al final de la ronda.

| Fecha de inicio del ciclo | Fecha de término del ciclo | Fecha de envío del informe preliminar | Fecha de envío del informe final |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| | | | |

Tabla 5.4: Programación del ejercicio.

- g) Descripción del ensayo.
 - g.1. Condiciones generales.
 - g.2. Establecimiento de los valores de calibración.
 - g.3. Estimación e informe de la incertidumbre de medida.
- h) Determinación del valor de referencia.
- i) Envío de resultados y protección de la información. Cómo deben ser enviados los resultados (toma de datos, informe de medición, certificado de calibración), a quién se deben enviar.
- j) Análisis de los resultados para determinar su consistencia y la existencia de datos dudosos.
- k) Métodos que podrán ser utilizados para la evaluación del desempeño de los participantes.
 - k.1. Determinación del desempeño de los participantes a través del error medio medio cuadrático (δ_{iRMS}).
 - k.2. Determinación del desempeño de los participantes a través de la relación de Birge.
 - k.3. Determinación del desempeño de los participantes a través del error normalizado.
- l) Elaboración, envío de informe preliminar y recepción de comentarios por parte de los participantes.
- m) Emisión y envío de informe final
- n) Referencias bibliográficas¹⁸

5.9. DESARROLLO DE LOS CONTROLES DE CALIDAD Y HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA GARANTIZAR LA CALIDAD LOS PROCESOS DE MEDICIÓN/CALIBRACIÓN. ESPECIFICACIONES.

Los procesos fundamentales del laboratorio son las actividades de calibración y medición.

El laboratorio cuenta con la infraestructura necesaria y suficiente para garantizar que se trabaja en condiciones constantes de reproducibilidad. Las salas de medición cuentan con control, monitoreo y medición de la variable de influencia de mayor importancia en Metrología Dimensional: LA TEMPERATURA.

Se cuenta con un sistema continuo que garantiza las condiciones ambientales requeridas por los tipos de mediciones y/o calibraciones que se realizan.

Como todo proceso, éstos también tienen que ser revisados constantemente, analizados y observar las posibles tendencias de los valores obtenidos como resultado de los mismos, las condiciones circundantes y del recurso humano que participa en ellos.

Existen métodos de calibración ya normalizados en los que se incluyen controles estadísticos como requisitos para la buena aplicación de los mismos.

Ese es el caso de la calibración de bloques patrón por comparación mecánica y la calibración de las mesas de planitud.

5.9.1. COMPARACIONES INTERNAS O EXTERNAS. USO DEL CRITERIO DEL ERROR NORMALIZADO.

El laboratorio cuenta con la herramienta estadística del criterio del Error normalizado para comprobar la calidad de las mediciones.

Para ello se programan comparaciones entre los tres laboratorios de Metrología Dimensional (CIDESI, Silao y lab. de Dimensional CIDESI en Nuevo León) y comparaciones internas en cada uno de los laboratorios.

En estas rondas de comparaciones se tiene en cuenta abarcar la mayor cantidad de alcances que el laboratorio calibra cotidianamente e igualmente se propone contemplar a todo el personal del laboratorio.

El valor de referencia se puede tener de diferentes formas:

- Cuando el laboratorio puede encontrarlo a través de una técnica superior, por ejemplo: cuando se calibran las reglas usamos cotidianamente el método de comparación en el banco de calibración de medidas con trazos. Para este caso el valor de referencia lo podemos obtener calibrando primeramente la regla que se intercompara con el sistema de visión.

- Cuando el laboratorio posea patrones de referencia calibrados por el CENAM, por ejemplo: se puede hacer un control de calidad para la calibración de bloques patrón usando dos patrones de referencia calibrados y comparando los resultados.

Cuando no es posible ninguna de las dos anteriores:

- El valor de referencia será por consenso y se calculará a través de una técnica robusta en donde se consideren tanto los errores como las incertidumbres de los participantes.

Para este caso se debe emplear las siguientes ecuaciones descritas en el apartado 5.6.1. de este procedimiento.

Independientemente que el E_n es un estadístico muy estricto, en el caso de instrumentos en donde se analizan varios puntos consideramos realizar la excepción de ampliar un poco el criterio del E_n considerando razonablemente un criterio más: el cuestionable.

Así proponemos que el E_n :

| Porcentaje de los puntos de calibración con $E_n < 1$ | Resultado |
|---|-----------------------|
| 100 | SATISFACTORIO (S) |
| 67 | CUESTIONABLE (C) |
| 33 | NO SATISFACTORIO (NS) |

Tabla 5.5: Criterios adicionales para la razón del error normalizado.

De estos ejercicios, en consideración del resultado del número E_n , podemos concluir acerca de la calidad de los trabajos que se realizan, tomar acciones correctivas (capacitación, recalibrar un instrumento, etc.) y tomar acciones de mejora.

5.9.2. OTRAS TÉCNICAS ESTADÍSTICAS DE USO EN EL LABORATORIO.

El laboratorio realiza pruebas con otros laboratorios acreditados para comprobar la calidad de las mediciones que realiza, para ello utiliza las siguientes pruebas:

5.9.2.1 ERROR MEDIO CUADRÁTICO.

Este estimador indica de qué orden fueron las desviaciones de los laboratorios con respecto a los valores de referencia consensuados.

Considerar las ecuaciones del apartado 5.6.2.

Se espera siempre que

$$\delta_{RMS} < \delta_{RMS\alpha}$$

5.9.2.2. RELACIÓN DE BIRGE.

La consistencia de los resultados x_{ij} y sus incertidumbres estándar se ajustan al modelo que define relación Birge (R_B).

Consultar el apartado 5.6.3.

Para el caso de las intercompaciones claves, si la R_B es igual o ligeramente menor a 1 (valor teóricamente esperado para R_B) significa que los resultados de las comparaciones son coherentes.

Por su parte si la R_B es significativamente mayor a 1 quiere decir que los resultados de las comparaciones son inconsistentes.

Dado que el cálculo de la R_B incluye las $u(x_{ij})$ que representan las desviaciones estándar de los resultados x_{ij} de los laboratorios, la R_B requiere que cada una de estas incertidumbres sean estimadas de manera confiable. Cuando esto no se cumple, la conclusión de R_B no deberá tomarse tan en serio.

La consistencia estadística de un control interno, una comparación, puede ser investigada por la denominada relación de Birge R_B , que **compara la dispersión observada de los resultados con la dispersión esperada de los datos que se informan con sus respectivas coherentes incertidumbres**. La aplicación de algoritmos de mínimos cuadrados y la prueba χ^2 puede conducir también a la estimación de la relación Birge.

5.10. SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE LOS CONTROLES DE CALIDAD: ASCAL.

Los controles de calidad o intercomparaciones serán planificados por el coordinador de los mismos, haciendo uso de la herramienta ASCAL, consultar el manual del mismo CID-I-SC-MT-DIM-007 "Manual de uso del sistema ASCAL".

El coordinador dará aviso a los integrantes del laboratorio de que se encuentra disponible un nuevo control de calidad o prueba de intercomparación.

5.11. EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA A TRAVÉS DE LA TÉCNICA DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO.

Ecuaciones para calcular el error cuadrático medio, el valor de referencia por consenso y la incertidumbre del valor de referencia consensuado y la incertidumbre externa.

$$R_{MS} = \frac{\sqrt{(x_i - X_{VA})^2 + u^2 + u_{VA}^2}}{\hat{\sigma}} \quad X_{VA} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{u_{xi}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_{xi}^2} \right)} \quad u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{xi}^2}}} \quad u_{lab} = \sqrt{\frac{(x - X)^2}{n-1}}$$

Donde

x_i = Valor reportado por el laboratorio

X = Valor asignado

u = Incertidumbre estándar de los laboratorios

u_{VA} = Incertidumbre estándar del valor asignado

σ = Desviación estándar para el propósito

Valor crítico o de comparación para el error cuadrático medio:

$$R_{MSC\alpha} = \sqrt{1 + \chi^{-2}(P;1)} \times \frac{u_{tot}}{\hat{\sigma}}$$

Donde:

$$u_{tot} = \sqrt{u_{lab}^2 + u_{VA}^2}$$

$$P = 1 - \alpha$$

Ejemplo:

| Metrólogo | valor mg | u, k=1 mg | U, k=2 mg | $\frac{x_i}{u^2(x_i)}$ | $\frac{1}{u^2(x_i)}$ | $u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{xi}^2}}}$ | R _B | Evaluación |
|------------------------|----------|--------------------------|-----------|--------------------------------|----------------------|---|----------------|------------|
| Pedro | 0,172 | 0,0100 | 0,0200 | 1720 | 10000 | 0,007537 | 10,05 | C |
| María | 0,173 | 0,0200 | 0,040 | 432,500 | 2500,000 | | 20,06 | NC |
| Perla | 0,171 | 0,0140 | 0,028 | 872,449 | 5102,041 | | 14,06 | C |
| Σ | | | | 3024,94898 | 17602,04082 | | | |
| X _{VA} 0,1719 | | u _{tot} 0,00760 | | Valor Crítico Rca; para α=0.05 | | 16,73 | | |
| s 0,0010 | | | | | | | | |
| ux=s 0,0010 | | | | | | | | |

5.12. EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA A TRAVÉS DE LA TÉCNICA LA RELACIÓN DE BIERGE.

Ecuación para calcular la relación de Birge:

$$R_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u^{-2}(x)(x - X)^2}{n-1}}$$

$$X_{VA} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{u_{xi}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_{xi}^2} \right)}$$

$$u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{xi}^2}}}$$

$$u_{lab}^2 = \frac{(x - X_{VA})^2}{n-1}$$

$$u_{lab} = \sqrt{\frac{(x - X_{VA})^2}{n-1}}$$

Donde:

x_i = Valor reportado por el laboratorio

X_{VA} = Valor asignado

u_x = Incertidumbre estándar de los laboratorios

u_x = Incertidumbre estándar del valor asignado

n = Número de participantes

Valor crítico de la relación de Birge:

$$R_{Bc} = \sqrt{\frac{\chi^2(P;1)}{n-1}}$$

Donde:

$$P = 1 - \alpha$$

n = Número de participantes

| Ejercicio 3: | | | | | | |
|--|---------------|---------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------|
| Metrólogo | valor μm | $u, k=1$ μm | $\frac{x_i}{u^2(x_i)}$ | $\frac{1}{u^2(x_i)}$ | $u^{-2}(x)(x - X)^2$ | Evaluación |
| Pedro | 0,172 | 0,0100 | 1720 | 10000 | 0,000 | Cumple |
| María | 0,173 | 0,0200 | 432,5 | 2500 | 0,003 | |
| Perla | 0,171 | 0,0140 | 872,44898 | 5102,04082 | 0,004 | |
| | | | Σ 3024,94898 | 17602,0408 | 0,007 | |
| X = 0,1719 | | | | | | |
| R _B = 0,06 | | | | | | |
| Comentario: Los laboratorios (excepto uno) tienen capacidad de reproducir el valor de referencia (ver hoja ecm), los resultados son consistentes ellos mismos. | | | | | | |

| Valor crítico R _{Bc} : $R_{Bc} = \sqrt{\frac{\chi^2(P;1)}{n-1}}$ | | | | |
|---|------|------|------|------|
| P | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 |
| n | 3 | 10 | 5 | 3 |
| n-1 | 2 | 9 | 4 | 2 |
| χ^2 | 6,0 | 16,9 | 9,5 | 6,0 |
| R _{Bc} | 1,73 | 1,37 | 1,54 | 1,73 |

CONCLUSIONES.

Por medio del presente trabajo se ha conseguido alcanzar los objetivos principales especificados en cómo general y específicos así como en el marco teórico.

El desarrollo de los estudios de comparaciones desarrollados y el análisis de los datos generados por ellos mismos permiten realizar las siguientes conclusiones.

CONCLUSIONES GENERALES.

1. Se ha constatado casi la ausencia total de estudios de comparaciones, controles de calidad externos o internos así como pruebas interlaboratorios en laboratorios de calibración que involucren las metodologías de la relación de Birge y el error medio cuadrático desde el estado del arte de laboratorios secundarios de calibración, por lo que se justificó el trabajo realizado.
2. Se desarrollaron las propuestas de determinación de valores críticos o de comparación para las técnicas del error medio cuadrático y la relación de Birge, determinándolos propiamente de los mismos valores involucrados en los estudios de controles de calidad y relacionándolas finalmente con el estadígrafo de la Chi cuadrada.
3. Se acotó claramente la definición o establecimientos de valores de consenso y sus respectivas incertidumbres.
4. Se establecen identificadas las posibilidades de uso del error normalizado y se introduce un criterio de uso del error normalizado cuando hay valores de consenso.
5. Se desarrolló la metodología para la planeación y ejecución de las actividades de control de calidad de los laboratorios de Metrología del CIDESI.
6. Se diseñó y produjo el software o herramienta informática para el desarrollo de los controles de calidad y el análisis de los mismos.
7. Se han especificado criterios fundamentales que permiten la elección de la herramienta estadística más idónea para cada caso.
8. Se desarrollaron 5 ejercicios de comparaciones a nivel de la zona Bajío en los que participaron en promedio 9 laboratorios acreditados, obteniéndose gran cantidad de datos que sirvieron para los análisis y definiciones de las herramientas estadísticas y los valores de comparación.
9. Se resalta la estimación de las incertidumbres de medida, haciendo un bosquejo de la misma y se indica como la primera herramienta que tenemos los laboratorios para comprobar la calidad de los datos producidos.

CONCLUSIONES PARTICULARES.

1. Los laboratorios de Metrología Dimensional del CIDESI ya tienen en uso la herramienta ASCAL para el control de la calidad de los resultados de las calibraciones y mediciones que realizan.
2. Los tiempos en la programación y ejecución de los controles de calidad se disminuyeron en 45%.
3. Los trabajos de supervisión de la calidad de los certificados e informes cuentan con un respaldo técnico que garantiza la calidad de la producción de datos.
4. El uso de otras técnicas, independientes al error normalizado, ha posibilitado al laboratorio y a sus metrologos una visión más completa del proceso de medición englobando las condiciones para la ejecución de los servicios, los métodos, la calidad de los datos y la estimación idónea de las incertidumbres de medida.

LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURO.

1. Generalización de las metodologías propuestas para todos los laboratorios de calibración del CIDESI en todas las magnitudes.
2. Ampliación de la programación del ASCAL para que se incluyan los indicadores Mandel, análisis de varianza, pruebas de detección de datos raros y otras herramientas estadísticas que puedan ser consideradas.
3. Analizar la factibilidad para la creación o incubación de un proveedor de Ensayos de Aptitud reconocido por la entidad mexicana de acreditación.

ANEXO A: EJERCICIO DE COMPARACIÓN ENTRE LABORATORIOS UTILIZANDO LAS TÉCNICAS DEL δ_{SMi} Y R_B .

A1. GENERALIDADES.

Se realizaron varios ejercicios prácticos con instrumentos de medición de uso común y frecuente en los laboratorios de calibración. Presentamos en este anexo, como ejemplo, la intercomparación **INTERLAB-EA-003/2014: ENSAYO DE APTITUD DE LA CALIBRACIÓN DE MICRÓMETROS PARA MEDICIONES DE EXTERIORES CON INTERVALO DE MEDIDA DE 0 mm A 25 mm Y RESOLUCIÓN DE 0,001 mm** realizada con 12 laboratorios acreditados de dimensional: 4 del cidesi y 8 externos, todos acreditados por la entidad mexicana de acreditación en el alcance del ibc.

El instrumento que se intercomparó se presenta en la siguiente figura:



Fig. A1. Micrómetro de exterior que se intercomparó.

Se circuló el instrumento según cronograma preestablecido.

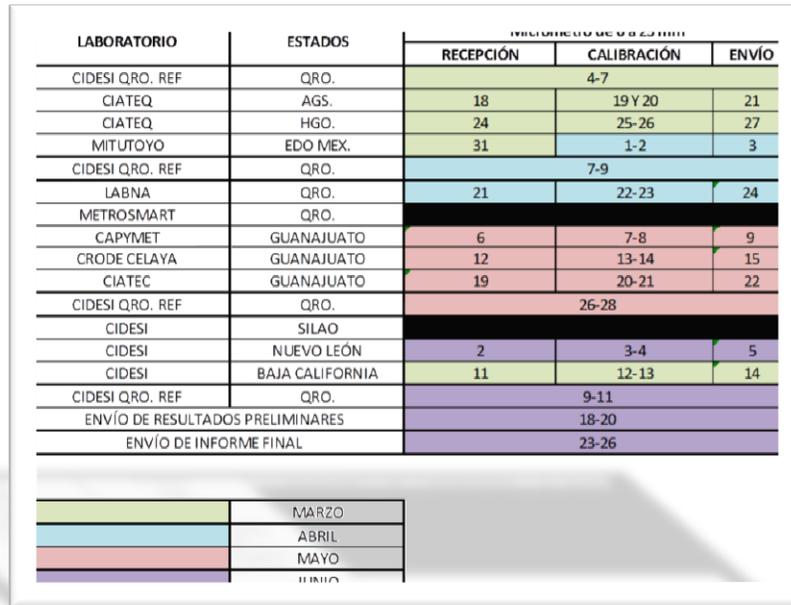


Fig. A2. Cronograma de mediciones

A2. ESTABILIDAD DEL INSTRUMENTO.

Cada tres laboratorios participantes se evaluó al instrumento para valorar si mantenía sus características. Los resultados de esta prueba de estabilidad se muestran en la siguiente figura.

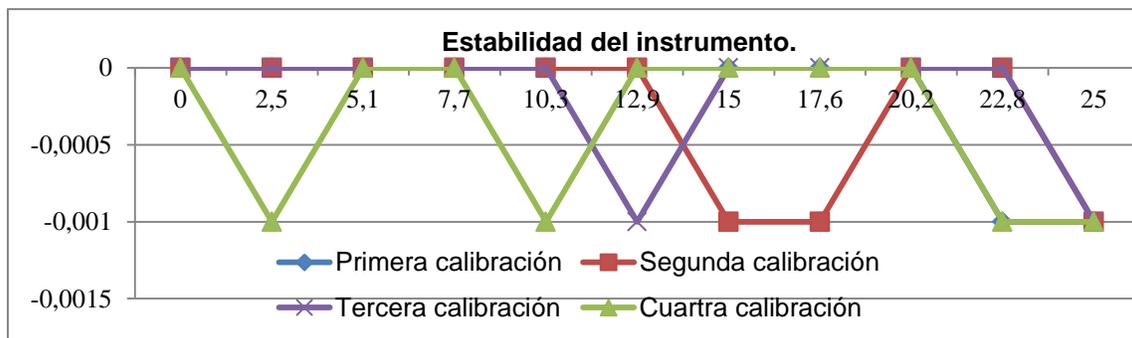


Fig. A3: Estabilidad del instrumento intercomparado.

El valor de referencia para esta comparación se calculó mediante la media ponderada de todos los resultados ($\varepsilon_{ij\ ref} = \bar{\varepsilon}_{ij}$)

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_{ij} u^{-2}(\varepsilon_{ij})}{\sum_{i=1}^m u^{-2}(\varepsilon_{ij})} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\varepsilon_{ij}}{u^2(\varepsilon_{ij})}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{u^2(\varepsilon_{ij})}} \quad \text{Equivalente a} \quad X_{VA} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{u_{x_i}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_{x_i}^2} \right)}$$

Donde:

- ε_{ij} .- Resultado obtenido para el punto de calibración “i” del laboratorio participante “j”.
- m.- Es el número de resultados considerados para el cálculo. Se debe cumplir que $m \leq n$; n es el número total de participantes.

Con incertidumbre:

$$u_{ext} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{u^2(\varepsilon_{ij})}}} \quad \text{Equivalente a} \quad u_{VA} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u_{x_i}^2}}}$$

A3. RELACIÓN DE BIRGE.

La consistencia de los resultados ε_{ij} y sus incertidumbres estándar se ajustan al modelo que define relación Birge (R_B).

Dado que el cálculo de la R_B incluye las $u(\varepsilon_{ij})$ que representan las desviaciones estándar de los resultados ε_{ij} de los laboratorios, la R_B requiere que cada una de estas incertidumbres sea estimada de manera confiable. Cuando esto no se cumple, la conclusión de R_B no deberá tomarse tan en serio.

Para observar la consistencia de los resultados se calcula R_B mediante la siguiente expresión:

$$R_B = \frac{u_{ext}}{u_{int}}$$

A4. ERROR CUADRÁTICO MEDIO (δ_{RMS}).

Este estimador indica de qué orden fueron las desviaciones de los laboratorios con respecto a los valores de referencia.

$$\delta_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{iref})^2}{n}}$$

Donde

$\delta_{RMS j}$ Desviación cuadrática media para el laboratorio participante j .

ε_{ij} Es el resultado en el punto i del participante j .

$\varepsilon_{ij ref}$ Es el valor de referencia en el punto i .

n Es el número de puntos a medir.

Los resultados analizados fueron los siguientes:

| Laboratorios Valor nominal, mm | Lab. 1 | | Lab. 2 | | Lab. 3 | | Lab. 4 | | Lab. 5 | |
|-----------------------------------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|
| | ε_{ij} | Uexp |
| 2,5 | 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0013 | 0,000 | 0,0008 | -0,001 | 0,0010 | 0,000 | 0,0012 |
| 5,1 | 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0013 | 0,000 | 0,0009 | -0,001 | 0,0010 | 0,000 | 0,0012 |
| 7,7 | 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0013 | 0,000 | 0,0009 | -0,001 | 0,0011 | 0,000 | 0,0011 |
| 10,3 | 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0014 | 0,000 | 0,0010 | -0,001 | 0,0011 | 0,000 | 0,0012 |
| 12,9 | 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0014 | 0,000 | 0,0010 | -0,001 | 0,0012 | -0,001 | 0,0012 |
| 15 | 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0014 | 0,000 | 0,0011 | -0,001 | 0,0012 | -0,001 | 0,0012 |
| 17,6 | 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0014 | 0,000 | 0,0011 | -0,001 | 0,0013 | -0,001 | 0,0012 |
| 20,2 | 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0015 | -0,001 | 0,0012 | -0,001 | 0,0013 | -0,001 | 0,0011 |
| 22,8 | 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0015 | -0,001 | 0,0012 | -0,001 | 0,0013 | -0,001 | 0,0011 |
| 25 | 0,000 | 0,0018 | -0,001 | 0,0015 | -0,001 | 0,0013 | -0,001 | 0,0014 | -0,001 | 0,0011 |

| Lab. 6 | | Lab. 7 | | Lab. 8 | | Lab. 9 | | Lab. 10 | | Lab. 11 | |
|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|
| ε_{ij} | Uexp |
| 0,000 | 0,0015 | 0,000 | 0,0015 | 0,000 | 0,0011 | -0,001 | 0,0007 | -0,001 | 0,0008 | 0,000 | 0,0011 |
| 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0016 | -0,001 | 0,0011 | 0,000 | 0,0007 | -0,001 | 0,0008 | 0,000 | 0,0011 |
| 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0011 | 0,000 | 0,0007 | -0,001 | 0,0008 | 0,000 | 0,0012 |
| 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0016 | 0,000 | 0,0011 | 0,000 | 0,0007 | 0,000 | 0,0008 | 0,000 | 0,0012 |
| 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0011 | 0,000 | 0,0007 | -0,001 | 0,0008 | 0,000 | 0,0012 |
| 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0017 | -0,001 | 0,0011 | -0,001 | 0,0007 | -0,001 | 0,0008 | 0,000 | 0,0012 |
| 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0017 | -0,001 | 0,0011 | 0,000 | 0,0007 | -0,001 | 0,0008 | 0,000 | 0,0012 |
| 0,000 | 0,0017 | 0,000 | 0,0017 | -0,001 | 0,0011 | 0,000 | 0,0007 | -0,001 | 0,0009 | 0,000 | 0,0013 |
| 0,000 | 0,0018 | 0,000 | 0,0018 | -0,001 | 0,0011 | -0,001 | 0,0007 | -0,001 | 0,0009 | -0,001 | 0,0013 |
| 0,000 | 0,0018 | 0,000 | 0,0018 | -0,001 | 0,0011 | -0,001 | 0,0007 | -0,001 | 0,0009 | -0,001 | 0,0013 |

Fig. A4: Valores reportados por los laboratorios y sus respectivas incertidumbres expandidas.

VALOR DE REFERENCIA CONSENSUADO

| Valor nominal Parámetros | 0 (verificación) | 2,5 | 5,1 | 7,7 | 10,3 | 12,9 | 15 | 17,6 | 20,2 | 22,8 | 25 |
|-----------------------------|---------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\bar{\varepsilon}_{ij}$ | 0,0000 | -0,0004 | -0,0003 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| u_{ext} | 0,0000 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| U | 0,0000 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0002 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0002 | 0,0002 |

Fig. A5. Valor de consenso y su incertidumbre

CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE BIRGE

| Laboratorios Valor nominal, mm | R_B |
|-----------------------------------|--------|
| | Todos |
| 2,5 | 0,0000 |
| 5,1 | 0,9824 |
| 7,7 | 0,3973 |
| 10,3 | 0,4137 |
| 12,9 | 0,2897 |
| 15 | 0,9429 |
| 17,6 | 0,8320 |
| 20,2 | 0,9112 |
| 22,8 | 0,5724 |
| 25 | 0,6943 |

Tabla A1. Valores de la Relación de Birge para cada punto de medición.

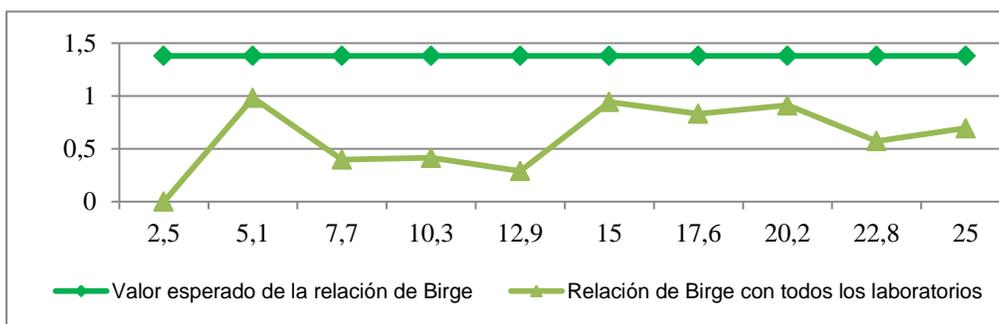


Fig. A6: Relación de Birge vs la Relación de Birge de comparación.

Error medio cuadrático

| Laboratorios | δ_{IRMS} |
|--------------|-----------------|
| 1 | 0,0005 |
| 2 | 0,0004 |
| 3 | 0,0004 |
| 4 | 0,0006 |
| 5 | 0,0004 |
| 6 | 0,0005 |
| 7 | 0,0005 |
| 8 | 0,0004 |
| 9 | 0,0004 |
| 10 | 0,0005 |
| 11 | 0,0004 |

Tabla A2. Error medio cuadrático

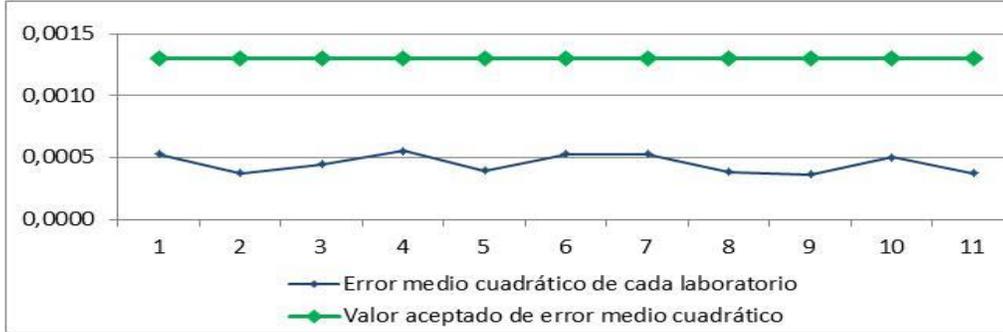


Fig. A7: Error medio cuadrático vs el error medio cuadrático de comparación.

A5. DESEMPEÑO GENERAL DEL EJERCICIO DE EA.

Este EA se considera **SATISFACTORIO** debido a que el 100% de los participantes obtuvieron resultados del En <1.

A6. INCERTIDUMBRES DE MEDIDA.

En general las incertidumbres de medida enunciadas por los laboratorios se consideran adecuadas para este tipo de calibraciones siendo en promedio del orden de 1,2 μm . Sin embargo se encuentran los siguientes casos:

Los laboratorios 1, 2, 6 y 7 presentan incertidumbres por encima del promedio.

Los laboratorios 9 y 10 presentan incertidumbres por debajo del promedio.

Por lo que se sugiere a estos laboratorios la revisión de sus incertidumbres, para una posible mejora.

A7. DESVIACIONES RESPECTO AL VALOR DE REFERENCIA.

Todos los laboratorios participantes obtuvieron valores del error medio cuadrático por debajo del que se consideró para este EA.

ANEXO B. VALORES DE INDICADORES MANDEL h Y k PARA EL 1%.

| <i>p</i> | <i>h</i> | <i>k</i> | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | | <i>n</i> | | | | | | | | |
| | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3 | 1,15 | 1,71 | 1,64 | 1,58 | 1,53 | 1,49 | 1,46 | 1,43 | 1,41 | 1,39 |
| 4 | 1,49 | 1,91 | 1,77 | 1,67 | 1,60 | 1,55 | 1,51 | 1,48 | 1,45 | 1,43 |
| 5 | 1,72 | 2,05 | 1,85 | 1,73 | 1,65 | 1,59 | 1,55 | 1,51 | 1,48 | 1,46 |
| 6 | 1,87 | 2,14 | 1,90 | 1,77 | 1,68 | 1,62 | 1,57 | 1,53 | 1,50 | 1,47 |
| 7 | 1,98 | 2,20 | 1,94 | 1,79 | 1,70 | 1,63 | 1,58 | 1,54 | 1,51 | 1,48 |
| 8 | 2,06 | 2,24 | 1,97 | 1,81 | 1,71 | 1,65 | 1,59 | 1,55 | 1,52 | 1,49 |
| 9 | 2,13 | 2,29 | 1,99 | 1,82 | 1,73 | 1,66 | 1,60 | 1,56 | 1,53 | 1,50 |
| 10 | 2,18 | 2,32 | 2,00 | 1,84 | 1,74 | 1,66 | 1,61 | 1,57 | 1,53 | 1,50 |
| 11 | 2,22 | 2,34 | 2,01 | 1,85 | 1,74 | 1,67 | 1,62 | 1,57 | 1,54 | 1,51 |
| 12 | 2,25 | 2,36 | 2,02 | 1,85 | 1,75 | 1,68 | 1,62 | 1,58 | 1,54 | 1,51 |
| 13 | 2,27 | 2,38 | 2,03 | 1,86 | 1,76 | 1,68 | 1,63 | 1,58 | 1,55 | 1,52 |
| 14 | 2,30 | 2,39 | 2,04 | 1,87 | 1,76 | 1,69 | 1,63 | 1,58 | 1,55 | 1,52 |
| 15 | 2,32 | 2,41 | 2,05 | 1,87 | 1,76 | 1,69 | 1,63 | 1,59 | 1,55 | 1,52 |
| 16 | 2,33 | 2,42 | 2,05 | 1,88 | 1,77 | 1,69 | 1,63 | 1,59 | 1,55 | 1,52 |
| 17 | 2,35 | 2,44 | 2,06 | 1,88 | 1,77 | 1,69 | 1,64 | 1,59 | 1,55 | 1,52 |
| 18 | 2,36 | 2,44 | 2,06 | 1,88 | 1,77 | 1,70 | 1,64 | 1,59 | 1,56 | 1,52 |
| 19 | 2,37 | 2,44 | 2,07 | 1,89 | 1,78 | 1,70 | 1,64 | 1,59 | 1,56 | 1,53 |
| 20 | 2,39 | 2,45 | 2,07 | 1,89 | 1,78 | 1,70 | 1,64 | 1,60 | 1,56 | 1,53 |
| 21 | 2,39 | 2,46 | 2,07 | 1,89 | 1,78 | 1,70 | 1,64 | 1,60 | 1,56 | 1,53 |
| 22 | 2,40 | 2,46 | 2,08 | 1,90 | 1,78 | 1,70 | 1,65 | 1,60 | 1,56 | 1,53 |
| 23 | 2,41 | 2,47 | 2,08 | 1,90 | 1,78 | 1,71 | 1,65 | 1,60 | 1,56 | 1,53 |
| 24 | 2,42 | 2,47 | 2,08 | 1,90 | 1,79 | 1,71 | 1,65 | 1,60 | 1,56 | 1,53 |
| 25 | 2,42 | 2,47 | 2,08 | 1,90 | 1,79 | 1,71 | 1,65 | 1,60 | 1,56 | 1,53 |
| 26 | 2,43 | 2,48 | 2,09 | 1,90 | 1,79 | 1,71 | 1,65 | 1,60 | 1,56 | 1,53 |
| 27 | 2,44 | 2,48 | 2,09 | 1,90 | 1,79 | 1,71 | 1,65 | 1,60 | 1,56 | 1,53 |
| 28 | 2,44 | 2,49 | 2,09 | 1,91 | 1,79 | 1,71 | 1,65 | 1,60 | 1,57 | 1,53 |
| 29 | 2,45 | 2,49 | 2,09 | 1,91 | 1,79 | 1,71 | 1,65 | 1,60 | 1,57 | 1,53 |
| 30 | 2,45 | 2,49 | 2,10 | 1,91 | 1,79 | 1,71 | 1,65 | 1,61 | 1,57 | 1,53 |
| p.- Número de laboratorios a un nivel dado. | | | | | | | | | | |
| n.- número de réplicas en la comparación a cada nivel. | | | | | | | | | | |

ANEXO B. VALORES DE INDICADORES MANDEL h Y k PARA EL 5%. Continuación.

| p | h | k | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | n | | | | | | | | |
| | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3 | 1,15 | 1,65 | 1,53 | 1,45 | 1,40 | 1,37 | 1,34 | 1,32 | 1,30 | 1,29 |
| 4 | 1,42 | 1,76 | 1,59 | 1,50 | 1,44 | 1,40 | 1,37 | 1,35 | 1,33 | 1,31 |
| 5 | 1,57 | 1,81 | 1,62 | 1,53 | 1,46 | 1,42 | 1,39 | 1,36 | 1,34 | 1,32 |
| 6 | 1,66 | 1,85 | 1,64 | 1,54 | 1,48 | 1,43 | 1,40 | 1,37 | 1,35 | 1,33 |
| 7 | 1,71 | 1,87 | 1,66 | 1,55 | 1,49 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 | 1,34 |
| 8 | 1,75 | 1,88 | 1,67 | 1,56 | 1,50 | 1,45 | 1,41 | 1,38 | 1,36 | 1,34 |
| 9 | 1,78 | 1,90 | 1,68 | 1,57 | 1,50 | 1,45 | 1,42 | 1,39 | 1,36 | 1,35 |
| 10 | 1,80 | 1,90 | 1,68 | 1,57 | 1,50 | 1,46 | 1,42 | 1,39 | 1,37 | 1,35 |
| 11 | 1,82 | 1,91 | 1,69 | 1,58 | 1,51 | 1,46 | 1,42 | 1,39 | 1,37 | 1,35 |
| 12 | 1,83 | 1,92 | 1,69 | 1,58 | 1,51 | 1,46 | 1,42 | 1,40 | 1,37 | 1,35 |
| 13 | 1,84 | 1,92 | 1,69 | 1,58 | 1,51 | 1,46 | 1,43 | 1,40 | 1,37 | 1,35 |
| 14 | 1,85 | 1,92 | 1,70 | 1,59 | 1,52 | 1,47 | 1,43 | 1,40 | 1,37 | 1,35 |
| 15 | 1,86 | 1,93 | 1,70 | 1,59 | 1,52 | 1,47 | 1,43 | 1,40 | 1,38 | 1,36 |
| 16 | 1,86 | 1,93 | 1,70 | 1,59 | 1,52 | 1,47 | 1,43 | 1,40 | 1,38 | 1,36 |
| 17 | 1,87 | 1,93 | 1,70 | 1,59 | 1,52 | 1,47 | 1,43 | 1,40 | 1,38 | 1,36 |
| 18 | 1,88 | 1,93 | 1,71 | 1,59 | 1,52 | 1,47 | 1,43 | 1,40 | 1,38 | 1,36 |
| 19 | 1,88 | 1,93 | 1,71 | 1,59 | 1,52 | 1,47 | 1,43 | 1,40 | 1,38 | 1,36 |
| 20 | 1,89 | 1,94 | 1,71 | 1,59 | 1,52 | 1,47 | 1,43 | 1,40 | 1,38 | 1,36 |
| 21 | 1,89 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,52 | 1,47 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 22 | 1,89 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,52 | 1,47 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 23 | 1,90 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,53 | 1,47 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 24 | 1,90 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,53 | 1,48 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 25 | 1,90 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,53 | 1,48 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 26 | 1,90 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,53 | 1,48 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 27 | 1,91 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,53 | 1,48 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 28 | 1,91 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,53 | 1,48 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 29 | 1,91 | 1,94 | 1,71 | 1,60 | 1,53 | 1,48 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| 30 | 1,91 | 1,94 | 1,72 | 1,60 | 1,53 | 1,48 | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,36 |
| p.- Número de laboratorios a un nivel dado. | | | | | | | | | | |
| n.- número de réplicas en la comparación a cada nivel. | | | | | | | | | | |

ANEXO C. VALORES CRÍTICOS PARA LA PRUEBA DE COCHRAN.

| $\alpha = 0,01$ | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| | n | | | | | | | | | | |
| k | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 145 | α |
| 2 | 0,9999 | 0,9950 | 0,9794 | 0,9586 | 0,9373 | 0,9172 | 0,8988 | 0,8823 | 0,8674 | 0,6062 | 0,5000 |
| 3 | 0,9933 | 0,9423 | 0,8831 | 0,8335 | 0,7933 | 0,7606 | 0,7335 | 0,7107 | 0,6912 | 0,4230 | 0,3333 |
| 4 | 0,9676 | 0,8643 | 0,7814 | 0,7212 | 0,6761 | 0,6410 | 0,6129 | 0,5897 | 0,5702 | 0,3251 | 0,2500 |
| 5 | 0,9279 | 0,7885 | 0,6957 | 0,6329 | 0,5875 | 0,5531 | 0,5259 | 0,5037 | 0,4854 | 0,2644 | 0,2000 |
| 6 | 0,8828 | 0,7218 | 0,6258 | 0,5635 | 0,5195 | 0,4866 | 0,4608 | 0,4401 | 0,4229 | 0,2229 | 0,1667 |
| 7 | 0,8376 | 0,6644 | 0,5685 | 0,5080 | 0,4659 | 0,4347 | 0,4105 | 0,3911 | 0,3751 | 0,1929 | 0,1429 |
| 8 | 0,7945 | 0,6152 | 0,5209 | 0,4627 | 0,4226 | 0,3932 | 0,3704 | 0,3522 | 0,3373 | 0,1700 | 0,1250 |
| 9 | 0,7544 | 0,5727 | 0,4810 | 0,4251 | 0,3870 | 0,3592 | 0,3378 | 0,3207 | 0,3067 | 0,1521 | 0,1111 |
| 10 | 0,7175 | 0,5358 | 0,4469 | 0,3934 | 0,3572 | 0,3308 | 0,3106 | 0,2945 | 0,2813 | 0,1376 | 0,1000 |
| 12 | 0,6528 | 0,4751 | 0,3919 | 0,3428 | 0,3099 | 0,2861 | 0,2680 | 0,2535 | 0,2419 | 0,1157 | 0,0833 |
| 15 | 0,5747 | 0,4069 | 0,3317 | 0,2882 | 0,2593 | 0,2386 | 0,2228 | 0,2104 | 0,2002 | 0,0934 | 0,0667 |
| 20 | 0,4799 | 0,3297 | 0,2654 | 0,2288 | 0,2048 | 0,1877 | 0,1748 | 0,1646 | 0,1567 | 0,0709 | 0,0500 |
| 24 | 0,4247 | 0,2871 | 0,2295 | 0,1970 | 0,1759 | 0,1608 | 0,1495 | 0,1406 | 0,1338 | 0,0595 | 0,0417 |
| 30 | 0,3632 | 0,2412 | 0,1913 | 0,1635 | 0,1454 | 0,1327 | 0,1232 | 0,1157 | 0,1100 | 0,0480 | 0,0333 |
| 40 | 0,2940 | 0,1915 | 0,1508 | 0,1281 | 0,1135 | 0,1033 | 0,0957 | 0,0898 | 0,0853 | 0,0363 | 0,0250 |
| 60 | 0,2151 | 0,1371 | 0,1069 | 0,0902 | 0,0796 | 0,0722 | 0,0668 | 0,0625 | 0,0594 | 0,0245 | 0,0167 |
| 120 | 0,1225 | 0,0759 | 0,0585 | 0,0489 | 0,0429 | 0,0387 | 0,0357 | 0,0334 | 0,0316 | 0,0125 | 0,0083 |
| α | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| $\alpha = 0,05$ | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| | n | | | | | | | | | | |
| k | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 145 | α |
| 2 | 0,9985 | 0,9750 | 0,9392 | 0,9057 | 0,8772 | 0,8534 | 0,8332 | 0,8159 | 0,8010 | 0,5813 | 0,5000 |
| 3 | 0,9669 | 0,8709 | 0,7977 | 0,7457 | 0,7071 | 0,6771 | 0,6530 | 0,6333 | 0,6167 | 0,4013 | 0,3333 |
| 4 | 0,9065 | 0,7679 | 0,6841 | 0,6287 | 0,5895 | 0,5598 | 0,5365 | 0,5175 | 0,5017 | 0,3093 | 0,2500 |
| 5 | 0,8412 | 0,6838 | 0,5981 | 0,5441 | 0,5065 | 0,4783 | 0,454 | 0,4387 | 0,4241 | 0,2513 | 0,2000 |
| 6 | 0,7808 | 0,6161 | 0,5321 | 0,4803 | 0,4447 | 0,4184 | 0,3980 | 0,3817 | 0,3682 | 0,2119 | 0,1667 |
| 7 | 0,7271 | 0,5612 | 0,4800 | 0,4307 | 0,3974 | 0,3726 | 0,3535 | 0,3384 | 0,3259 | 0,1833 | 0,1429 |
| 8 | 0,6798 | 0,5157 | 0,4377 | 0,3910 | 0,3595 | 0,3362 | 0,3185 | 0,3043 | 0,2926 | 0,1616 | 0,1250 |
| 9 | 0,6385 | 0,4775 | 0,4027 | 0,3584 | 0,3286 | 0,3067 | 0,2901 | 0,2768 | 0,2659 | 0,1446 | 0,1111 |
| 10 | 0,6020 | 0,4450 | 0,3733 | 0,3311 | 0,3029 | 0,2823 | 0,2666 | 0,2541 | 0,2439 | 0,1308 | 0,1000 |
| 12 | 0,5410 | 0,3924 | 0,3264 | 0,2880 | 0,2624 | 0,2439 | 0,2299 | 0,2187 | 0,2098 | 0,1100 | 0,0833 |
| 15 | 0,4709 | 0,3346 | 0,2758 | 0,2419 | 0,2195 | 0,2034 | 0,1911 | 0,1815 | 0,1736 | 0,0889 | 0,0667 |
| 20 | 0,3894 | 0,2705 | 0,2205 | 0,1921 | 0,1735 | 0,1602 | 0,1501 | 0,1422 | 0,1357 | 0,0675 | 0,0500 |
| 24 | 0,3434 | 0,2354 | 0,1907 | 0,1656 | 0,1493 | 0,1374 | 0,1286 | 0,1216 | 0,1160 | 0,0567 | 0,0417 |
| 30 | 0,2929 | 0,1980 | 0,1593 | 0,1377 | 0,1237 | 0,1137 | 0,1061 | 0,1002 | 0,0958 | 0,0457 | 0,0333 |
| 40 | 0,2370 | 0,1576 | 0,1259 | 0,1082 | 0,0968 | 0,0887 | 0,0827 | 0,0780 | 0,0745 | 0,0347 | 0,0250 |
| 60 | 0,1737 | 0,1131 | 0,0895 | 0,0765 | 0,0682 | 0,0623 | 0,0583 | 0,0552 | 0,0520 | 0,0234 | 0,0167 |
| 120 | 0,0998 | 0,0632 | 0,0495 | 0,0419 | 0,0371 | 0,0337 | 0,0312 | 0,0292 | 0,0279 | 0,0120 | 0,0083 |
| α | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

ANEXO D. VALORES CRÍTICOS PARA LA PRUEBA DE GRUBBS.

ANEXO E. VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F.

| v ₂ | F _{0,05} (v ₁ ,v ₂) | | | | | | | | | | |
|----------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | α |
| 1 | 161,45 | 199,50 | 215,71 | 224,58 | 230,16 | 233,99 | 236,77 | 238,88 | 240,54 | 241,88 | 254,31 |
| 2 | 18,51 | 19,00 | 19,16 | 19,25 | 19,30 | 19,33 | 19,35 | 19,37 | 19,38 | 19,40 | 19,50 |
| 3 | 10,13 | 9,55 | 9,28 | 9,12 | 9,01 | 8,94 | 8,89 | 8,85 | 8,81 | 8,79 | 8,53 |
| 4 | 7,71 | 6,94 | 6,59 | 6,39 | 6,26 | 6,16 | 6,09 | 6,04 | 6,00 | 5,96 | 5,63 |
| 5 | 6,61 | 5,79 | 5,41 | 5,19 | 5,05 | 4,95 | 4,88 | 4,82 | 4,77 | 4,74 | 4,36 |
| 6 | 5,99 | 5,14 | 4,76 | 4,53 | 4,39 | 4,28 | 4,21 | 4,15 | 4,10 | 4,06 | 3,67 |
| 7 | 5,99 | 4,74 | 4,35 | 4,12 | 3,97 | 3,87 | 3,79 | 3,73 | 3,68 | 3,64 | 3,23 |
| 8 | 5,32 | 4,46 | 4,07 | 3,84 | 3,69 | 3,58 | 3,50 | 3,44 | 3,39 | 3,35 | 2,93 |
| 9 | 5,12 | 4,26 | 3,86 | 3,63 | 3,48 | 3,37 | 3,29 | 3,23 | 3,18 | 3,14 | 2,71 |
| 10 | 4,96 | 4,10 | 3,71 | 3,48 | 3,33 | 3,22 | 3,14 | 3,07 | 3,02 | 2,98 | 2,54 |
| 11 | 4,84 | 3,98 | 3,59 | 3,36 | 3,20 | 3,09 | 3,01 | 2,95 | 2,90 | 2,85 | 2,40 |
| 12 | 4,75 | 3,89 | 3,49 | 3,26 | 3,11 | 3,00 | 2,91 | 2,85 | 2,80 | 2,75 | 2,30 |
| 13 | 4,67 | 3,81 | 3,41 | 3,18 | 3,03 | 2,92 | 2,83 | 2,77 | 2,71 | 2,67 | 2,21 |
| 14 | 4,60 | 3,74 | 3,34 | 3,11 | 2,96 | 2,85 | 2,76 | 2,70 | 2,65 | 2,60 | 2,13 |
| 15 | 4,54 | 3,68 | 3,29 | 3,06 | 2,90 | 2,79 | 2,71 | 2,64 | 2,59 | 2,54 | 2,07 |
| 16 | 4,49 | 3,63 | 3,24 | 3,01 | 2,85 | 2,74 | 2,66 | 2,59 | 2,54 | 2,49 | 2,01 |
| 17 | 4,45 | 3,59 | 3,20 | 2,96 | 2,81 | 2,70 | 2,61 | 2,55 | 2,49 | 2,45 | 1,96 |
| 18 | 4,41 | 3,55 | 3,16 | 2,93 | 2,77 | 2,66 | 2,58 | 2,51 | 2,46 | 2,41 | 1,92 |
| 19 | 4,38 | 3,52 | 3,13 | 2,90 | 2,74 | 2,63 | 2,54 | 2,48 | 2,42 | 2,38 | 1,88 |
| 20 | 4,35 | 3,49 | 3,10 | 2,87 | 2,71 | 2,60 | 2,51 | 2,45 | 2,39 | 2,35 | 1,84 |
| 21 | 4,32 | 3,47 | 3,07 | 2,84 | 2,68 | 2,57 | 2,49 | 2,42 | 2,37 | 2,32 | 1,81 |
| 22 | 4,30 | 3,44 | 3,05 | 2,82 | 2,66 | 2,55 | 2,46 | 2,40 | 2,34 | 2,30 | 1,78 |
| 23 | 4,28 | 3,42 | 3,03 | 2,80 | 2,64 | 2,53 | 2,44 | 2,37 | 2,32 | 2,27 | 1,76 |
| 24 | 4,26 | 3,40 | 3,01 | 2,78 | 2,62 | 2,51 | 2,42 | 2,36 | 2,30 | 2,25 | 1,73 |
| 25 | 4,24 | 3,39 | 2,99 | 2,76 | 2,60 | 2,49 | 2,40 | 2,34 | 2,28 | 2,24 | 1,71 |
| 26 | 4,23 | 3,37 | 2,98 | 2,74 | 2,59 | 2,47 | 2,39 | 2,32 | 2,27 | 2,22 | 1,69 |
| 27 | 4,21 | 3,35 | 2,96 | 2,73 | 2,57 | 2,46 | 2,37 | 2,31 | 2,25 | 2,20 | 1,67 |
| 28 | 4,20 | 3,34 | 2,95 | 2,71 | 2,56 | 2,45 | 2,36 | 2,29 | 2,24 | 2,19 | 1,65 |
| 29 | 4,18 | 3,33 | 2,93 | 2,70 | 2,55 | 2,43 | 2,35 | 2,28 | 2,22 | 2,18 | 1,64 |
| 30 | 4,17 | 3,32 | 2,92 | 2,69 | 2,53 | 2,42 | 2,33 | 2,27 | 2,21 | 2,16 | 1,62 |
| 40 | 4,08 | 3,23 | 2,84 | 2,61 | 2,45 | 2,34 | 2,25 | 2,18 | 2,12 | 2,08 | 1,51 |
| 60 | 4,00 | 3,15 | 2,76 | 2,53 | 2,37 | 2,25 | 2,17 | 2,10 | 2,04 | 1,99 | 1,39 |
| 120 | 3,92 | 3,07 | 2,68 | 2,45 | 2,29 | 2,18 | 2,09 | 2,02 | 1,96 | 1,91 | 1,25 |
| α | 3,84 | 3,00 | 2,60 | 2,37 | 2,21 | 2,10 | 2,01 | 1,94 | 1,88 | 1,83 | 1,00 |

ANEXO F. VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN χ^2 .

| v | α | | | | | | | | | |
|----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0,995 | 0,99 | 0,98 | 0,975 | 0,95 | 0,90 | 0,80 | 0,75 | 0,70 | 0,50 |
| 1 | 0,0 ⁴ 393 | 0,0 ³ 157 | 0,0 ² 628 | 0,0 ³ 982 | 0,00393 | 0,0158 | 0,0642 | 0,102 | 0,148 | 0,455 |
| 2 | 0,0100 | 2,0201 | 0,0404 | 0,0506 | 0,103 | 0,211 | 0,446 | 0,575 | 0,713 | 1,386 |
| 3 | 0,0717 | 0,115 | 0,185 | 0,216 | 0,352 | 0584 | 1,005 | 1,213 | 1,424 | 2,366 |
| 4 | 0,207 | 0,297 | 0,429 | 0,484 | 0,711 | 1,064 | 1,649 | 1,923 | 2,195 | 3,357 |
| 5 | 0,412 | 0,554 | 0,752 | 0,831 | 1,145 | 1,610 | 2,343 | 2,675 | 3,000 | 4,351 |
| 6 | 0,676 | 0,872 | 1,134 | 1,237 | 1,635 | 2,204 | 3,070 | 3,455 | 3,828 | 5,348 |
| 7 | 0,989 | 1,239 | 1,564 | 1,690 | 2,167 | 2,833 | 3,822 | 4,255 | 4,671 | 6,346 |
| 8 | 1,344 | 1,647 | 2,032 | 2,180 | 2,733 | 3,490 | 4,594 | 5,071 | 5,527 | 7,344 |
| 9 | 1,735 | 2,088 | 2,532 | 2,700 | 3,325 | 4,168 | 5,380 | 5,899 | 6,393 | 8,343 |
| 10 | 2,156 | 2,558 | 3,059 | 3,247 | 3,940 | 4,865 | 6,179 | 6,737 | 7,067 | 9,342 |
| 11 | 2,603 | 3,053 | 3,609 | 3,816 | 4,575 | 5,578 | 6,989 | 7,584 | 8,18 | 10,341 |
| 12 | 3,074 | 3,571 | 4,178 | 4,404 | 5,226 | 6,304 | 7,807 | 8,438 | 9,034 | 11,340 |
| 13 | 3,565 | 4,107 | 4,765 | 5,009 | 5,892 | 7,041 | 8,634 | 9,299 | 9,926 | 12,340 |
| 14 | 4,075 | 4,660 | 5,368 | 5,629 | 6,571 | 7,790 | 9,467 | 10,165 | 10,821 | 13,339 |
| 15 | 4,601 | 5,229 | 5,985 | 6,262 | 7,261 | 8,547 | 10,307 | 11,037 | 11,721 | 14,339 |
| 16 | 5,142 | 5,812 | 6,614 | 6,908 | 7,962 | 9,312 | 11,152 | 11,912 | 12,624 | 15,338 |
| 17 | 5,697 | 6,408 | 7,255 | 7,564 | 8,672 | 10,085 | 12,002 | 12,792 | 13,531 | 16,338 |
| 18 | 6,265 | 7,015 | 7,906 | 8,231 | 9,390 | 10,865 | 12,857 | 13,675 | 14,440 | 17,338 |
| 19 | 6,844 | 7,633 | 8,567 | 8,907 | 10,117 | 11,651 | 13,716 | 14,562 | 15,352 | 18,338 |
| 20 | 7,434 | 8,260 | 9,237 | 9,591 | 10,851 | 12,443 | 14,578 | 15,452 | 16,266 | 19,337 |
| 21 | 8,034 | 8,897 | 9,915 | 10,283 | 11,591 | 13,240 | 15,445 | 16,344 | 17,182 | 20,337 |
| 22 | 8,643 | 9,542 | 10,600 | 10,982 | 12,338 | 14,041 | 16,314 | 17,240 | 18,101 | 21,337 |
| 23 | 9,260 | 10,196 | 11,293 | 11,689 | 13,091 | 14,848 | 17,187 | 18,137 | 19,021 | 22,337 |
| 24 | 9,886 | 10,856 | 11,992 | 12,401 | 13,848 | 15,659 | 18,062 | 19,037 | 19,743 | 23,337 |
| 25 | 10,520 | 11,524 | 12,697 | 13,120 | 14,611 | 16,473 | 18,940 | 19,939 | 20,867 | 24,337 |
| 26 | 11,160 | 12,198 | 13,409 | 13,844 | 15,379 | 17,292 | 19,820 | 20,843 | 21,792 | 25,336 |
| 27 | 11,808 | 12,878 | 14,125 | 14,573 | 16,151 | 18,114 | 20,703 | 21,749 | 22,719 | 26,336 |
| 28 | 12,461 | 13,565 | 14,847 | 15,308 | 16,928 | 18,939 | 21,588 | 22,657 | 23,647 | 27,336 |
| 29 | 13,121 | 14,256 | 15,574 | 16,047 | 17,708 | 19,768 | 22,475 | 23,567 | 24,577 | 28,336 |
| 30 | 13,787 | 14,953 | 16,306 | 16,791 | 18,493 | 20,599 | 23,364 | 24,478 | 25,508 | 29,336 |
| 40 | 20,707 | 22,164 | 23,838 | 24,433 | 26,509 | 29,051 | 32,345 | 33,66 | 34,872 | 39,335 |
| 50 | 27,991 | 29,707 | 31,664 | 32,357 | 34,764 | 37,689 | 41,449 | 42,942 | 44,313 | 49,335 |
| 60 | 35,534 | 37,485 | 39,699 | 40,482 | 42,188 | 46,459 | 50,641 | 52,294 | 53,809 | 59,335 |

ANEXO F. VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN χ^2 . Continuación.

| v | α | | | | | | | | | |
|----|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|
| | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,025 | 0,02 | 0,01 | 0,005 | 0,001 |
| 1 | 1,074 | 1,323 | 1,642 | 2,706 | 3,841 | 5,024 | 5,412 | 6,635 | 7,879 | 10,827 |
| 2 | 2,408 | 2,773 | 3,219 | 4,605 | 5,991 | 7,378 | 7,824 | 9,210 | 10,597 | 13,815 |
| 3 | 3,665 | 4,108 | 4,642 | 6,251 | 7,815 | 9,348 | 9,837 | 11,345 | 12,838 | 16,266 |
| 4 | 4,878 | 5,385 | 5,989 | 7,779 | 9,488 | 11,143 | 11,668 | 13,277 | 14,860 | 18,466 |
| 5 | 6,064 | 6,626 | 7,289 | 9,236 | 11,070 | 12,832 | 13,388 | 15,086 | 16,750 | 20,515 |
| 6 | 7,231 | 7,841 | 8,558 | 10,645 | 12,592 | 14,449 | 15,033 | 16,812 | 18,548 | 22,457 |
| 7 | 8,383 | 9,037 | 9,803 | 12,017 | 14,067 | 16,013 | 16,622 | 18,475 | 20,278 | 24,321 |
| 8 | 9,524 | 10,219 | 11,030 | 13,362 | 15,507 | 17,535 | 18,168 | 20,090 | 21,955 | 26,124 |
| 9 | 10,656 | 11,389 | 12,242 | 14,684 | 16,919 | 19,023 | 19,679 | 21,666 | 23,589 | 27,877 |
| 10 | 11,781 | 12,549 | 13,442 | 15,987 | 18,307 | 20,483 | 21,161 | 23,209 | 25,188 | 29,588 |
| 11 | 12,899 | 13,701 | 14,631 | 17,275 | 19,675 | 21,920 | 22,168 | 24,725 | 26,757 | 31,264 |
| 12 | 14,011 | 14,845 | 15,812 | 18,549 | 21,206 | 23,337 | 24,054 | 26,217 | 28,300 | 32,909 |
| 13 | 15,119 | 15,984 | 16,985 | 19,812 | 22,362 | 24,736 | 25,471 | 27,688 | 29,819 | 34,527 |
| 14 | 16,222 | 17,117 | 18,151 | 21,064 | 23,685 | 26,119 | 26,873 | 29,141 | 31,319 | 36,124 |
| 15 | 17,322 | 18,245 | 19,311 | 22,307 | 24,996 | 27,488 | 28,259 | 30,578 | 32,801 | 37,698 |
| 16 | 18,418 | 19,369 | 20,465 | 23,542 | 26,296 | 28,845 | 29,633 | 32,000 | 34,267 | 39,252 |
| 17 | 19,511 | 20,489 | 21,615 | 24,769 | 27,587 | 30,191 | 30,995 | 33,409 | 35,718 | 40,791 |
| 18 | 20,601 | 21,605 | 22,760 | 25,989 | 28,869 | 31,526 | 32,346 | 34,805 | 37,156 | 42,312 |
| 19 | 21,689 | 22,718 | 23,900 | 27,204 | 30,144 | 32,852 | 33,687 | 36,191 | 38,582 | 43,819 |
| 20 | 22,775 | 23,828 | 25,038 | 28,412 | 31,410 | 34,170 | 35,020 | 37,566 | 39,997 | 45,314 |
| 21 | 23,858 | 24,935 | 26,171 | 29,615 | 32,671 | 35,479 | 36,343 | 38,932 | 41,401 | 46,796 |
| 22 | 24,939 | 26,039 | 27,301 | 30,813 | 33,294 | 36,781 | 37,659 | 40,289 | 42,796 | 48,268 |
| 23 | 26,018 | 27,141 | 28,429 | 32,007 | 35,172 | 38,076 | 38,968 | 41,638 | 44,181 | 49,728 |
| 24 | 27,096 | 28,241 | 29,553 | 33,196 | 36,145 | 39,364 | 40,270 | 42,980 | 45,558 | 51,179 |
| 25 | 28,172 | 29,339 | 30,675 | 34,382 | 37,652 | 40,646 | 41,566 | 44,314 | 46,928 | 52,619 |
| 26 | 29,246 | 30,435 | 31,795 | 35,563 | 38,885 | 41,923 | 42,856 | 45,642 | 48,290 | 54,051 |
| 27 | 30,319 | 31,528 | 32,912 | 36,741 | 40,113 | 43,195 | 44,140 | 46,963 | 49,645 | 55,475 |
| 28 | 31,391 | 32,620 | 34,027 | 37,916 | 41,337 | 44,461 | 45,419 | 48,278 | 50,994 | 56,892 |
| 29 | 31,461 | 33,711 | 35,139 | 39,087 | 42,557 | 45,722 | 46,693 | 49,588 | 52,335 | 58,301 |
| 30 | 33,530 | 34,800 | 36,250 | 40,256 | 43,773 | 46,979 | 47,962 | 50,892 | 53,672 | 59,702 |
| 40 | 44,165 | 45,616 | 47,269 | 51,508 | 55,758 | 59,342 | 60,436 | 63,691 | 66,766 | 73,403 |
| 50 | 54,723 | 56,334 | 58,164 | 63,167 | 67,505 | 71,420 | 72,6134,605 | 76,154 | 79,490 | 86,660 |
| 60 | 65,226 | 66,981 | 68,972 | 74,397 | 79,082 | 83,298 | 84,586,251 | 88,379 | 91,952 | 99,608 |

BIBLIOGRAFÍA.

LIBROS.

1. Walpole, Ronald E. y Raymond H. Myers, Probabilidad y estadística. Editorial Pearson Educación, México 8ª edición: 2007
2. Murray R. Spiegel, Larry J. Stephens. Estadística. Tercera edición en español. Serie Schaum. McGRAW-HILL. México, 2002.
3. Montgomery, Douglas C y Runger George C., Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería, Editorial Mc. Graw Hill, 1ª edición, 1996.
4. Boisseau J.F.: Méthodologie de la mesure. Techniques de l'Ingenieur, col. R1, R.140. Paris, 1989.
5. Gutiérrez Humberto y de la Vara Román. Control estadístico de calidad y seis sigmas. Editorial Mc Graw Hill. 2ª edición, 2009.

NORMAS.

6. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.
7. NMX-CH-140-IMNC-2002. Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones.
8. NMX-EC-17025-IMNC-2006 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. México IMNC 2006. Pág. 22.
9. NMX-CH-5725-2-IMNC:2006. Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y a reproducibilidad de un método de medición normalizado.
10. NMX-CH-17043-IMNC:2010: Evaluación de la conformidad – Requisitos generales para los ensayos de aptitud.
11. NMX-CH-13528-IMNC-2007: Métodos estadísticos para su uso en ensayos de aptitud por comparaciones interlaboratorios.
12. NMX-Z-055-IMNC-2009: Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM).

13. NMX-CH-2602-IMNC-2008: Interpretación estadística de resultados de prueba – estimación de la media – intervalo de confianza.
14. NMX-CH-22971-IMNC-2008: Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Guía práctica para el uso de la norma mexicana NMX-CH-5725-2-IMNC-2006 en el diseño, implementación y análisis estadístico de los resultados de repetibilidad y reproducibilidad interlaboratorios.
15. ISO 3534-1: Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: Probability and general statistics terms.
16. ISO 3534-2: Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: Statistical quality control.

ARTÍCULOS CONSULTADOS.

17. Guide to the software Engineering body of knowledge. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Computer Society. 2004.
18. Combined result and associated uncertainty from interlaboratory evaluation based on the ISO Guide. R. Kacker, R. Datla and A. Parr. Metrología 2002.
19. Key Comparison. CCL-KL. Calibration of gauge blocks by interferometry. Rinal report. Wabern, November 2000.
20. National Physical Laboratory (NPL) Statistical Analysis of Interlaboratory comparisons. November 1999,
21. Report on SIM.L.K1 (SIM.4.2). Regional Comparison. Calibration of gauges blocks by optical interferometry. Final Report. September 2006,
22. Taller en Ensayos de Aptitud. L.O. Becerra, H. Gasca, V. González, L.M. Peña, M. Viliesid, Querétaro, Octubre de 2013.

SIMBOLOGÍA.

| | |
|-------------|--|
| NMX.- | Norma mexicana. |
| IMNC.- | Instituto mexicano de normalización y certificación. |
| CIPM.- | Comité Internacional de Pesas y Medidas. |
| BIPM.- | Buró Internacional de Pesas y Medidas. |
| ema.- | Entidad mexicana de acreditación, ac. |
| CENAM.- | Centro Nacional de Metrología. |
| CIDESI.- | Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. |
| SI.- | Sistema internacional de medidas. |
| SGUM.- | Sistema general de unidades de medidas. |
| Ibc ó IBC.- | Instrumento bajo calibración o ítem de medición. |
| Ítem.- | Pieza o muestra utilizada para medición. |
| u .- | Incertidumbre estándar, parcial o individual. |
| u_c .- | Incertidumbre estándar combinada. |
| U .- | Incertidumbre expandida. |
| EMT.- | Error máximo tolerado (permisible). |
| ASCAL.- | Aplicación para controles de calidad denominada Aseguramiento de la Calidad. |
| EA.- | Ensayo de aptitud. |
| CC.- | Control de calidad. |

TÉRMINOS Y DEFINICIONES.

Términos generales de Metrología establecidos en [12]

1. **Medición:** Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.
 2. Las mediciones no son de aplicación a las propiedades cualitativas.
 3. La medición supone una comparación de magnitudes, e incluye el conteo de entidades.
 4. Una medición supone una descripción de la magnitud compatible con el uso previsto de un resultado de medida, un procedimiento de medida y un sistema de medida calibrado conforme a un procedimiento de medida especificado, incluyendo las condiciones de medida.
5. **Magnitud:** Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia.
6. **Mensurando:** magnitud que se desea medir.
7. **Error de medida:** diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.
8. **Error aleatorio:** componente del error de medida que, en mediciones realizadas bajo condiciones de repetibilidad, varía de manera impredecible.
9. **Error sistemático:** componente del error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible.
10. **Exactitud de medida:** proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.

Notas:

- El concepto de “exactitud de medida” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida.
 - El término “exactitud de medida” no debe utilizarse en lugar de “veracidad de medida”; al igual que el término “precisión de medida” tampoco debe utilizarse en lugar de “exactitud de medida”, ya que esta última incluye ambos conceptos.
 - La exactitud de medida se interpreta a veces como la proximidad entre los valores medidos atribuidos al mensurando.
11. **Repetibilidad de medida:** Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.

12. **Condición de repetibilidad de una medición:** condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un período corto de tiempo.
13. **Reproducibilidad de medida:** precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de reproducibilidad.
14. **Condición de reproducibilidad de una medida:** condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares.
15. **Trazabilidad metrológica:** propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.
16. **Incertidumbre de medida:** parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando a partir de la información que se utiliza.

Notas:

- La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.
 - El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida, o una semiamplitud con una probabilidad de cobertura determinada.
 - En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.
17. **Incertidumbre expandida de medida:** producto de una incertidumbre típica combinada y un factor mayor que uno.
 18. **Intervalo de cobertura:** Intervalo que contiene el conjunto de valores verdaderos de un mensurando con una probabilidad determinada, basada en la información disponible.

19. **Probabilidad de cobertura:** probabilidad de que el conjunto de los valores verdaderos de un mensurando esté contenido en un intervalo de cobertura especificado.
20. **Factor de cobertura:** número mayor que uno por el que se multiplica una incertidumbre típica combinada para obtener una incertidumbre expandida.
21. **Calibración:** operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

Notas:

1. Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.
 2. Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamadas incorrectamente “autocalibración”, ni con una verificación de la calibración.
 3. Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.
22. **Histéresis:** Es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el instrumento de medida cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente.

TÉRMINOS REFERIDOS A LA ESTADÍSTICA:

Se consideraron los términos establecidos en ISO 3544 partes 1 y 2 [15],[16]

1. **Estadística paramétrica:** Es parte de la estadística que exige determinados requisitos para emplear en la inferencia estadística; generalmente requiere para su uso el supuesto de normalidad, es decir que las muestras aleatorias se extraen de poblaciones que están normalmente distribuidas, o aproximadamente normal.
2. **Experimento:** Es una técnica utilizada para encontrar el comportamiento de una variable a partir de diferentes combinaciones de factores o variables de entrada de un proceso, que al cambiar afectan la respuesta.
3. **Población finita:** Es aquella en la que es posible enumerar (contar) físicamente los elementos que pertenecen a la población.
4. **Población o universo:** Es cualquier conjunto de unidades o elementos claramente definido, en el espacio y el tiempo, donde los elementos pueden ser los datos provenientes de las mediciones.
5. **Prueba de hipótesis:** es el proceso estadístico que se sigue para la toma de decisiones a partir de la información de la muestra. Comparando el valor del estadístico experimental con el valor teórico, se rechaza o se acepta la hipótesis nula (H_0). Lo contrario a la hipótesis se le llama hipótesis alterna (H_1).
6. **Tamaño de muestra:** Es el número de elementos u observaciones que tomamos. Se denota por n ó N .
7. **Laboratorio de referencia:** Laboratorio que da los valores de referencia de un objeto de prueba.
8. **Valor asignado de consenso:** Valor atribuido a una cantidad particular por consenso a través de una media robusta, con una incertidumbre apropiada para el propósito.
9. **Laboratorio coordinador:** Laboratorio o persona con la responsabilidad de organizar todas las actividades involucradas en la operación de un ejercicio de control de calidad o intercomparación.
10. **Desviación:** Valor menos su valor de referencia. Es el resultado de una medición menos el valor de (convencionalmente) verdadero de la magnitud medida. También se conoce como la cercanía entre el promedio de una gran cantidad de series de resultados y el valor de referencia aceptado.
11. **Dato raro o fuera de contexto:** Miembro de una serie de datos que es inconsistente con relación a los otros datos de la misma serie.
12. **Dato extremo o aberrante:** Dato raro u otro valor que es altamente inconsistente con relación a los otros de ese juego de datos.

-
13. **Técnica estadística robusta:** Técnica para minimizar la influencia de resultados extremos que pueden influir sobre la media o la desviación normal.