

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



Tesis presentada en opción al grado académico de
Máster en Automática y Sistemas Informáticos

Calibración metrológica de los sistemas de medidas

Autor: Ing. Emerita Veitia Alvarez

Tutor: Dr. C. Eduardo Izaguirre Castellanos

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



Tesis presentada en opción al grado académico de
Máster en Automática y Sistemas Informáticos

Calibración metrológica de los sistemas de medidas

Autor: Ing. Emerita Veitia Alvarez

emerita @ativc.une.cu

Tutor: Dr. C. Eduardo Izaguirre Castellanos

Profesor Titular. Dpto. de Automática y Sistemas
Computacionales
izaguirre@uclv.edu.cu

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de maestría fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de máster en Automática y Sistemas Informáticos, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certifican que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección del centro, y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“La Ciencia comienza donde empieza la medición, no siendo posible la ciencia exacta en ausencia de mediciones”.

Dimitri Ivanovich Mendeleiev

DEDICATORIA

A mis padres, por el apoyo en cada decisión tomada y su confianza en el éxito.

A mis hijos, que me impulsaron en la idea de ésta maestría.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a todos los que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo, en especial a las compañeras del laboratorio de calibración de la Unidad Empresarial de Base de la Empresa de Tecnología de la Información y Automática de Villa Clara (UEB ATI-Villa Clara), Tania García Rodríguez y Dayamis Moya Ferraz, por la ayuda invaluable.

Al tutor por la adecuada conducción en la estrategia investigativa llevada a cabo y el impulso a hacer realidad esta presentación.

TAREA TÉCNICA

1. Revisión de las fuentes bibliográficas especializadas con el tema objeto de investigación.
2. Evaluación del proceder actual para la determinación de la incertidumbre como parte del proceso de calibración.
3. Revisión del proceder para la calibración de los sistemas de medida teniendo en cuenta las respuestas estáticas y dinámicas del mismo.
4. Modificación del proceder de las calibraciones de sistemas y cadenas de medida que se aplica en los laboratorios de la UEB ATI-Villa Clara para la mejora de la calidad de este proceso.
5. Proponer métodos computacionales para el procesamiento de los datos derivados del resultado de la calibración de los sistemas y cadenas de medida.
6. Validación de los resultados.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

La calibración de los instrumentos y sistemas de medida, es un tema de gran interés hoy en la rama de la metrología. Aspectos importantes como el establecimiento de los modelos matemáticos, la determinación de los errores y de la incertidumbre de la medición constituyen temas importantes en el mundo de los metrologos. En este contexto, este trabajo de investigación consiste en la propuesta de una nueva instrucción con la metodología para la realización de las calibraciones de los sistemas y cadenas de medida y el cálculo de la incertidumbre asociada al proceso de medición, que tienen en cuenta algunos requisitos tales como la influencia de la deriva de los patrones, la selección del factor de cobertura "k", la determinación de la función de distribución asociada, y otros asociados a la toma de datos; aspecto novedoso, pues la que actualmente se utiliza en ATI adolece de estos análisis. En tal sentido se realiza una revisión de la bibliografía especializada dentro del objeto de investigación, se proponen modificaciones al proceder para la calibración y la determinación de la incertidumbre de la medición de los sistemas y cadenas de medida y se propone un algoritmo para el procesamiento de los datos de manera computarizada.

ABSTRACT

The Calibration of instruments and measurement systems, is a subject of great interest today in the field of metrology. Important aspects such as the establishment of mathematical models, the determination of the errors and the measurement of the uncertainty are important issues in the world of metrologists. In this context, this research is the proposal of a new instruction with the methodology for performing calibrations of systems and measuring chains and the calculation of the uncertainty associated with the measurement process, taking into account some requirements such as the influence of drift patterns, selection of the coverage factor "k", the determination of the distribution function associated, and other associated data collection; novel aspect, as currently used in ATI suffers from these analyzes. In this regard a review of specialized research within the scope of literature is made, amendments are proposed to proceed for calibration and determination of the uncertainty of the measurement systems and measuring chains and an algorithm for processing is proposed so computerized data.

Tabla de contenido

PENSAMIENTO.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
TAREA TÉCNICA	V
RESUMEN.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	1
DESARROLLO	11
CAPITULO 1. La metrología. Marco teórico referencial.....	11
1.1. Introducción	11
1.2. La metrología y su desarrollo a nivel mundial.....	13
1.3. La metrología en Cuba.....	16
1.4. Definiciones básicas en metrología.....	19
1.5. Términos y conceptos estadísticos básicos utilizados en metrología	28
1.6. Los instrumentos de medidas y sus errores	30
1.7. La calibración.....	34
1.8. La incertidumbre de las mediciones	36
1.9. Conclusiones parciales	38
CAPÍTULO 2. Propuesta de proceder para realizar la determinación de la Incertidumbre.	40
2.1 Introducción.....	40
2.2 Procedimiento general para el cálculo de la incertidumbre	41
2.2.1 Definición del mensurando	41
2.2.2 Establecer el modelo matemático.....	43
2.2.3 Identificación y análisis de las fuentes de incertidumbres	43
2.2.4 Determinación de la incertidumbre estándar combinada	49
2.2.5 Cálculo de la incertidumbre expandida	50
2.2.6 Expresión de la incertidumbre expandida	56
2.3 Conclusiones parciales.....	57
CAPÍTULO 3 Propuesta de proceder para la calibración metrológica de los sistemas de medidas.....	59
3.1. Introducción.....	59

3.2.	Procedimiento para la calibración de sistemas y cadenas de medida.....	60
3.2.1	Generalidades para el proceso de calibración.	60
3.2.2	Determinación de las características del sistema	62
3.2.3	Corridas y toma de datos.....	63
3.2.4	Toma de datos para la determinación de los errores de indicación y para la determinación histéresis más la zona muerta.	64
3.2.5	Toma de datos para la determinación de los errores de accionamiento de las alarmas y/o de los disparos	65
3.2.6	Toma de datos para la caracterización del sistema ante la respuesta a una entrada paso.	65
3.2.7	Procesamiento de los datos.....	66
3.2.8	Estimación de la incertidumbre estándar.	68
3.3.	Procesamiento de los datos y presentación de los resultados.	85
3.4.	Conclusiones parciales.....	86
	CONCLUSIONES	88
	RECOMENDACIONES	90
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	Anexo A. Funciones de distribución	97
	Anexo B. Acta de calibración para un ciclo	102
	Anexo C. Acta de calibración para más de un ciclo.....	104
	Anexo D. Certificado de Calibración.....	106
	Anexo E. Algoritmo de las hojas de cálculo en Excel.	110
	Anexo F. Ejemplo de salida del procesamiento utilizando la herramienta informática diseñada.....	135

INTRODUCCIÓN

En todo proceso industrial, por muy sencillo que sea, es siempre necesario el uso de instrumentos de medida, que permitan: mantener los parámetros de calidad de los productos generados por el proceso, supervisar la operación del proceso, recopilar información referente a los volúmenes de producción, cantidad de materia prima consumida, condiciones inseguras de operación, etc. Una parte importante en el proceso de medida es la determinación de los errores y su análisis, para ello es necesario tener total confianza en la calidad con que se mide. Unos errores de mediciones aparentemente pequeños, provocados por técnicas de calibración no satisfactorias, pueden tener como resultado grandes pérdidas de ingresos. [1]

La exactitud de los resultados obtenidos de la medición depende de la calidad de las mediciones, es decir, de la exactitud de los instrumentos de medidas y de los procedimientos de medición utilizados. Independientemente de lo avanzado que sea el sistema de automatización de procesos, el control no puede ser mejor que la calidad de las mediciones obtenidas del proceso. [2]

Los avances en metrología son básicos para la innovación, y potencian todas las áreas de la ciencia. La industria necesita contar con claros fundamentos metrológicos que sustenten sus decisiones tecnológicas y sus políticas de innovación. [3]

Al resultado de la medición “y”, se le asocia un intervalo $\pm U$ que representa la estimación de su incertidumbre. [4]. Entonces, siempre existe la posibilidad de que un valor, fuera de los límites de tolerancia, sea medido por un sistema como que está dentro de la tolerancia. Por otro lado también existe la posibilidad que un valor dentro de los límites de tolerancia, sea medido por un sistema como que está fuera de la tolerancia establecida por las especificaciones. Esos dos casos juntos, son referidos como factor de riesgo de medición. Una manera de controlar el factor de riesgo de medición es teniendo una incertidumbre de medida mucho más

pequeña en comparación a los límites de tolerancia. [5]

Reducir al máximo el riesgo de que el sistema de medida produzca resultados con errores fuera de tolerancias; y cuidar que se mantenga dentro de los límites aceptables es responsabilidad de la función metrológica en las empresas [6]. Las revisiones periódicas del buen funcionamiento de los instrumentos y sistemas de medida pueden evitar muchos problemas y, por consiguiente, ahorro económico.

La Metrología como "ciencia de las mediciones y sus aplicaciones" [7] a diferencia de otras ciencias en Cuba, cuenta con pocos textos específicos disponibles, que posibiliten su estudio. Su literatura, se encuentra ampliamente dispersa y aparece fundamentalmente en forma de documentos normativos internos y artículos publicados en revistas, eventos y otros medios, teniendo como base a las organizaciones internacionales que elaboran los documentos normativos, recomendaciones, etc.

Para asegurar que se realizan mediciones confiables se debe garantizar que los instrumentos y/o sistemas de medidas sean calibrados y/o verificados. Un instrumento o sistema de medida calibrado permite conocer los niveles de errores e incertidumbre con que se realiza el proceso de medición y, además, que es trazable a un patrón nacional o internacional, que se determine según el esquema de trazabilidad acordado. De esta forma ya el círculo se cierra: "no hay calidad sin control y no hay control sin mediciones". [8].

En Cuba, para garantizar mantener la trazabilidad de las mediciones a los patrones nacionales e internacionales el Decreto Ley 183 "de la Metrología [9] exige la realización en períodos planificados del proceso de calibración y/o verificación a cada instrumento de medida. Total confianza se tiene cuando ese proceso de calibración se realiza en un laboratorio que tenga implementado un Sistema de Gestión según establece la norma vigente NC/ISO IEC 17025 [10] y más aún si este se encuentra acreditado por un órgano competente.

Las mediciones erróneas inciden negativamente en el esfuerzo económico que

emprende Cuba, según expresó Elba Rosa Pérez Montoya, Ministra de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente [11]. Una medición confiable respalda el buen uso de los recursos, por lo que “es un aspecto cardinal en la actualización del modelo económico de la isla”, por otro lado,.....Raúl Castro Ruz, Presidente de Cuba, en su intervención de la reunión del Consejo de Ministros celebrada en Noviembre/2012, planteó además que “es una cuestión que no necesita grandes inversiones, lo primero es darle la importancia que precisa, porque en este tema ha habido una ignorancia supina”. [11]

“En el actual mundo competitivo, no sobreviven en el mercado las mercancías no aseguradas metrológicamente, de ahí que Cuba refuerza las bases para desarrollar dicha disciplina, dirigida tanto a los productos y servicios que salen o entran por sus fronteras como a los que se producen en la nación”, expresó el General de Ejército Raúl Castro Ruz en reunión del Consejo de Ministros. [11]

En la Unión Eléctrica (UNE) existe gran cantidad de instrumentos y sistemas de medida para garantizar el funcionamiento efectivo en las plantas generadoras, transmisoras y distribuidoras a lo largo de todo el país. A partir de los años 90 la situación del aseguramiento metrológico en general se tornó crítica, es decir, no se garantizaba por parte de los laboratorios del Sistema Nacional de Metrología (SENAMET) la trazabilidad de todas las mediciones, por la carencia de recursos para enviar los patrones a calibrar al exterior y para adquirir nuevos patrones y auxiliares; esto hacía que los laboratorios de las industrias no garantizaran la calidad de sus mediciones; ello unido a la poca importancia dada a esta actividad por parte de los directivos, que racionalizaron las plazas de metrólogos en sus entidades [12]. A inicios de la primera década del 2000, la UNE comenzó la ardua tarea de recuperación de la actividad metrológica en sus entidades, para ello la dirección de metrología se trazó estrategias de trabajo, dentro de ellas a modo de diagnóstico, se comenzaron a realizar ciclos de auditorías de metrología, unidas a la idea de diseñar y tratar de implementar un Sistema de Gestión de las Mediciones, para lo que se elaboró el Manual de Metrología de la UNE [13],

documento creado para dar cumplimiento a la base legal existente en el país para esta disciplina, partiendo de lo establecido en el Decreto Ley 183 "De la Metrología", y de la necesidad de un software de control metrológico, para facilitar su implementación; gracias a lo cual se pudo revitalizar la actividad metrológica de forma organizada, logrando que se garantizara la trazabilidad de las mediciones fundamentales en las diferentes empresas del sistema UNE; además se mantiene actualizado en materia de documentos legales y su implementación al personal que realiza la función metrológica en estas entidades.

La UNE hace mucho énfasis en la necesidad de calibrar no sólo el instrumento de medida, o cada uno de los elementos que componen los sistemas de medida, sino también el sistema completo, o sea desde el sensor hasta el indicador.

En la implementación de la estrategia de trabajo trazada por la dirección técnica de la UNE se realizaron ciclos de auditorías metrológicas a manera de diagnóstico en todas sus entidades, obteniendo como resultado que la metrología estaba en mal estado: no se tenían calibrados los sistemas de medidas, partiendo de que no existía organización, ni documentación en el país para realizar la calibración, sólo se contaba en las Centrales Termoeléctricas (CTE) con el ajuste que previo a cada mantenimiento realiza el personal de automática a los sistemas y cadenas de medida, sin garantizar la trazabilidad de sus mediciones y sin quedar constancia alguna de manera legal, tal como lo está exigiendo la UNE a sus entidades.

Ante esta disyuntiva y para tratar de dar solución a la problemática de poder calibrar los sistemas y cadenas de medida se le plantea la tarea de elaborar un proceder en una norma ramal a la Empresa de Tecnología de la Información y Automática (ATI), específicamente a la UEB - Villa Clara, responsabilidad que fundamentalmente recae en el Laboratorio de Calibración de dicha entidad. A partir del año 2006, se dan los primeros pasos con la elaboración de la primera versión de una propuesta de Norma Ramal para la calibración de los sistemas de medida, gestión que no fructificó por problemas organizativos del comité de

normalización de la UNE en el que se presentó. Esta norma resulta de vital importancia para poder sustentar la prestación de este servicio, sobre un proceder normalizado en todo el territorio nacional, para ser utilizado por cualquier laboratorio de calibración, acreditado o no, y cumplir además con la política del país, de que todos los servicios que se presten estén amparados por normas. Valorando esa necesidad fue incluida en el programa de normalización del país para el año 2013, y aún no se ha cumplido.

Ante dicha situación se elaboró en ATI UEB - Villa Clara una Instrucción de Calibración [14], que utilizó como referencia el método que se describe en la Norma Internacional EC, 61298-2. [15], y se comenzaron los trabajos de aplicación para perfilar su adecuación a la situación real de trabajo. En esta instrucción se proponen hojas de cálculo en Excel para el procesamiento de los datos tomados en las lecturas de los instrumentos de medidas durante el proceso de calibración y de la evaluación de las fuentes de incertidumbres.

Las calibraciones que se realizan actualmente sólo incluyen las características estáticas del sistema, no teniendo en cuenta las características dinámicas del mismo, sin embargo cuando este sistema de medición forma parte de un sistema de control el retardo en la velocidad de respuesta modifica de forma indeseable la respuesta del sistema de control, además se hace necesaria una revisión de la identificación y evaluación de las fuentes de incertidumbres que están presentes en el proceso de medición, de todo el proceder para su identificación, cuantificación y expresión final.

En este trabajo, se pretende proponer una nueva instrucción con el proceder para realizar las calibraciones metrológicas de los sistemas y cadenas de medida, incluida la presentación de los resultados con la incertidumbre asociada, dado que la existente en la UEB ATI Villa Clara, adolece de requisitos tales como la respuesta dinámica del sistema, la influencia de la deriva de los patrones utilizados en el cálculo de incertidumbre, la selección del factor “k” y la

determinación de la función de distribución asociada, lo cual provoca que la instrucción actual no recoja todos los elementos que caracterizan al sistema o la cadena de medida, y la expresión del resultado final no tenga en cuenta los requisitos expresados anteriormente, lo cual repercute negativamente en la calidad de la calibración de los sistemas y cadenas de medida, de manera que se pueda contar con un nuevo procedimiento para realizar dichas calibraciones que posibilite tener en cuenta estos requisitos y por tanto se asegure la mejora continua del proceso de calibración.

Con la implementación de la nueva propuesta de instrucción, se resuelve la problemática de poder calibrar los sistemas y cadenas de medida, y de esta forma garantizar la trazabilidad de estas mediciones hacia los patrones nacionales e internacionales.

Por todo lo planteado anteriormente, resulta necesario elaborar una nueva instrucción con la metodología para la realización de las calibraciones de los sistemas y cadenas de medida y el cálculo de la incertidumbre asociada al proceso de medición, con vistas a garantizar la trazabilidad de estas mediciones en las entidades de la UNE, al poder realizar las calibraciones de los sistemas y cadenas de medida. Por consiguiente, se puede definir que el objeto de investigación se enmarca en la calibración metrológica de sistemas y cadenas de medidas.

En este sentido se plantea un proceder para realizar dichas calibraciones, teniendo en cuenta expresar el resultado final incluyendo el cálculo de la incertidumbre asociada, por lo que se presenta también el proceder para la determinación de dicho valor de incertidumbre, además se establecen hojas de cálculo en Excel para el procesamiento de los resultados; por todo lo cual, se determina que el campo de investigación se enmarca en la metrología enfocada hacia la calibración de los sistemas de medida, en los laboratorios de calibración de UEB ATI Villa Clara, planteándose el siguiente problema científico: Dada la

ausencia de algunos requisitos tales como la influencia de la deriva de los patrones utilizados en el cálculo de incertidumbre, la selección del factor de cobertura “k”, la determinación de la función de distribución asociada, la respuesta dinámica del sistema y otros asociados a la toma de datos (ciclos de medición, cantidad de puntos); es que resulta necesario perfeccionar el proceder actual para la calibración de los sistemas de medida utilizada por el laboratorio de calibración de la UEB ATI-Villa Clara, para que pueda servir su generalización como propuesta de norma cubana.

Dado la experiencia de más de 30 años de prestación de servicios del Laboratorio de Calibración de la Empresa de Tecnología de la Información y Automática (ATI), de la UEB - Villa Clara, ante la existencia del problema científico antes mencionado, y en función del conocimiento de las normas y procedimientos existentes en esta esfera del conocimiento, se arriba al planteamiento de la siguiente hipótesis de investigación:

Hipótesis: Es posible desarrollar un proceder para realizar la calibración metrológica de sistemas y cadenas de medida en la UEB ATI Villa Clara, aplicable en el laboratorio de calibración de esta propia entidad, que posibilita realizar el proceso de calibración de esta nomenclatura teniendo en cuenta todos los requisitos técnicos que garantizan mejorar la calidad en este proceso de calibración.

Por consiguiente se plantean los siguientes objetivos del trabajo de investigación.

Objetivo general: Proponer modificaciones en el proceder para la calibración de los sistemas y cadenas de medida que se aplica en los laboratorios de la UEB ATI-Villa Clara para la aumentar la calidad de dicho proceso.

Objetivos específicos.

- Analizar los fundamentos teóricos relacionados con la metrología y los procesos de medición en la bibliografía especializada dentro del objeto de investigación.

- Realizar propuestas de modificaciones al proceder para la determinación de la incertidumbre de la medición.
- Realizar propuestas de modificaciones al proceder en la calibración de los sistemas y cadenas de medida.
- Efectuar el procesamiento de los datos para obtener el resultado final de las calibraciones, a partir de las modificaciones incluidas en el proceder para la calibración de los sistemas y cadenas de medida.
- Evaluar los resultados obtenidos.

Para cumplir con los objetivos del trabajo se considera el planteamiento de las siguientes tareas investigativas:

- Revisión de las fuentes bibliográficas especializadas con el tema objeto de investigación.
- Evaluación del proceder actual para la determinación de la incertidumbre como parte del proceso de calibración.
- Revisión del proceder para la calibración de los sistemas de medida teniendo en cuenta las respuestas estáticas y dinámicas del mismo.
- Modificación del proceder de las calibraciones de sistemas y cadenas de medida que se aplica en los laboratorios de la UEB ATI-Villa Clara para la mejora de la calidad de este proceso.
- Proponer métodos computacionales para el procesamiento de los datos derivados del resultado de la calibración de los sistemas y cadenas de medida.
- Validación de los resultados.

La novedad científica del trabajo, radica en haber obtenido la caracterización de los sistemas de medida desde el punto de vista estático y dinámico, contando con un proceder documentado para ello, incluyendo un software de cálculo en hojas Excel para el procesamiento de los datos del proceso de calibración.

Este trabajo, tiene aportes teórico, práctico y metodológico; en el plano teórico aporta una re-concepción de la instrucción de calibración de cadenas y sistemas de medida a fin de mejorar la calidad del proceso de calibración ampliando los resultados de la salida del proceso, mientras que en el contexto práctico se propone una modificación general al proceder actual para el proceso de calibración, desde la concepción de cómo realizar el proceso hasta el procesamiento de los resultados en un nuevo software de cálculo y la presentación de los resultados. En el ámbito metodológico se propone una nueva instrucción para la calibración de cadenas y sistemas de medida; y un software de cálculo en hojas Excel para el procesamiento de los resultados de las calibraciones y la presentación de los mismos en el Certificado de Calibración por lo que se permite contar con un proceder para la calibración de cadenas y sistemas de medida, el cual puede ser aplicado por cualquier laboratorio de calibración del país, que posea los recursos necesarios. Además fue necesario revisar y proponer modificaciones al proceder existente en la UEB para la determinación de la incertidumbre.

Con las pretensiones anteriores se espera lograr impactos económicos, tecnológicos, metodológicos y ambientales. En cuanto a los impactos económicos se espera reducir costos por concepto de calibración, por conceptos de pérdidas al garantizar la confiabilidad de las mediciones, al mantener la calidad del producto final y al consumir sólo los recursos (medibles) necesarios. El impacto tecnológico se logra, al aumentar la confianza de los procesos de medición.

Como impacto ambiental, se contribuye a que disminuya la contaminación ambiental por emisiones a la atmósfera, contaminación de los suelos y vertimientos, al asegurar que estén bien medidas y bajo control las variables que regulan los desechos ambientales.

Esta investigación es viable por cuanto es interés de la Unión Eléctrica su aplicación, en lo fundamental en los laboratorios de calibración de la empresa

existente para estos fines (ATI), y se encuentran disponibles los recursos humanos, financieros y de infraestructura, para aplicar, o implementar, los resultados derivados de la misma.

Estructura de la tesis

La tesis cuenta de tres capítulos con sus epígrafes correspondientes. En el primer capítulo se tratan los fundamentos relacionados con la metrología, su desarrollo a nivel mundial y en particular en nuestro país. Se aborda el marco teórico con un enfoque dirigido a concebir el objeto de investigación de la tesis sobre la base de una actualizada revisión bibliográfica. Se incursiona en los conceptos fundamentales en este campo del conocimiento, disponiendo de los basamentos teóricos para asimilar los aspectos que serán tratados en capítulos siguientes.

En el segundo capítulo se aborda lo referente a la propuesta de procedimiento general para realizar el cálculo de la incertidumbre de la medición, el cual debe ser de conocimiento para expresar el resultado final de cualquier calibración metrológica, e incluye una explicación detallada de cada uno de los pasos a seguir, haciendo especial énfasis en la evaluación de las fuentes de incertidumbres y los casos prácticos que se pueden presentar.

En el capítulo tres se presenta el proceder para realizar la calibración metrológica e incluye: la determinación de las características del sistema, cómo realizar las corridas, la toma de datos y la utilización de un software en Excel para el procesamiento y la presentación de los resultados en el Certificado de Calibración.

Al finalizar cada capítulo aparecen recogidas las conclusiones parciales.

DESARROLLO

CAPITULO 1. La metrología. Marco teórico referencial.

En este capítulo se incursiona en los aspectos principales relativos a la metrología, su desarrollo a nivel mundial y en Cuba. Se aborda el marco teórico con un enfoque dirigido a concebir el objeto de investigación de la tesis sobre la base de una actualizada revisión de la bibliografía. Se incursiona en los conceptos fundamentales en este campo del conocimiento, disponiendo de los basamentos teóricos para asimilar los aspectos que serán tratados en capítulos siguientes.

1.1. Introducción

La metrología como la ciencia de la medida, está presente en todos los campos de actividad de la investigación y el desarrollo, cubre tres actividades principales: definición de las unidades de medida internacionalmente aceptadas, realización de las unidades de medidas por métodos científicos y establecimiento de las cadenas de trazabilidad. [16]

La actividad de un proceso de medición liga de manera ineludible aspectos técnicos, administrativos, estadísticos, instrumentales y de personal, estableciendo cada uno de estos sus propios parámetros de control que aseguren la conformidad de los datos que se obtienen en dicho proceso. [17]

Un proceso de medición ideal siempre proporcionará mediciones “verdaderas”, lo cual implica que se tienen propiedades estadísticas de varianza cero, errores cero, y consecuentemente cero probabilidad de decisiones erróneas. Desafortunadamente este tipo de procesos de medición no existe, lo cual da cabida a que los sistemas o procesos de medición no estén acorde a las exactitudes requeridas, costos, facilidades de uso, etc.

En los países industrializados se estima que las medidas tienen un costo equivalente en sus economías de más del uno por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) y un retorno equivalente entre el dos por ciento y el siete por ciento del PIB, por lo que la metrología supone una parte vital de la actividad diaria de la

sociedad. La medición sistemática, con incertidumbre determinada, es una de las bases del control de calidad industrial, hasta el punto que, en las industrias más modernas, el costo de las mediciones supone del 10 % al 15 % de los costos de producción. [3]

La información sobre esta disciplina tiene una estructura en forma de pirámide, en cuyo vértice se encuentran las organizaciones internacionales que elaboran los documentos normativos, recomendaciones, etc. y cuya base son los servicios metrologógicos especializados.

En la actualidad, la metrología tiene un impacto cada vez más determinante sobre las actividades industriales, científicas, comerciales y jurídicas en el mundo entero, afianzado con mayor fuerza por la implantación de las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO), tales como son por ejemplo: la ISO 9001 [18] e ISO 14001 [19]. Todos los países reconocen la necesidad de tener una estructura coherente a escala nacional para organizar e institucionalizar la metrología.

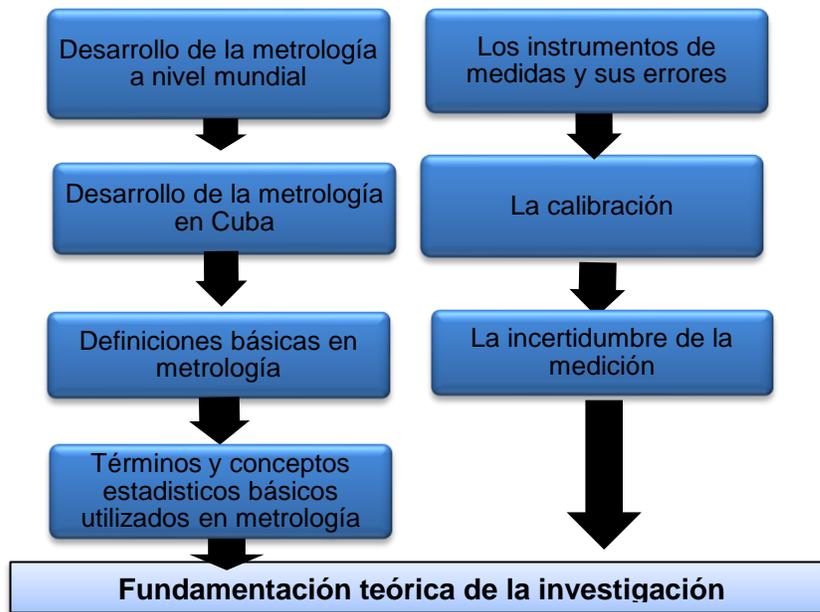


Figura 1.1: Hilo conductor de la investigación, en función del marco teórico estudiado.

Desde el punto de vista metodológico, y en correspondencia con marco teórico analizado, se determina que para el desarrollo de la investigación se seguirá el hilo conductor que se muestra en la figura 1.1.

1.2. La metrología y su desarrollo a nivel mundial

Antes del Sistema Métrico Decimal, los humanos no tenían más remedio que buscar una alternativa para contabilizar e intercambiar productos. Así aparece el pie, como unidad de medida útil para medir pequeñas parcelas; el codo, útil para medir piezas de tela u otros objetos que se pueden colocar a la altura del brazo, en un mostrador o similar; el paso, útil para medir terrenos más grandes, caminando por las lindes. Para medidas más pequeñas, de objetos delicados, aparece la palma y, para menores longitudes, el dedo. Al necesitarse una correspondencia entre unas unidades y otras, aparecen las primeras equivalencias entre dedos, palmas, pie y codo. Así que una vez decidido cuanto mide un pie, o un codo, todas las demás medidas se obtienen a partir de ellas, con lo cual puede hacerse un primer esbozo de un sistema antropométrico coherente. [20]

Hasta el Renacimiento, la mayor parte de la información existente sobre metrología se refiere a su aplicación en las transacciones comerciales y en las exacciones de impuestos. Sólo a partir del Renacimiento se hace visible la distinción entre metrología científica y otras actividades metrológicas, que se pudiera denominar “de aplicación”. [20]

Uno de los hechos más trascendentales en el devenir del desarrollo de la metrología lo constituyó la Convención Internacional del Metro, celebrada el 20 de mayo de 1875, en París, donde se creó el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), al que se le asignaron importantes funciones relacionadas con el establecimiento de un orden único internacional en materia de Metrología. [21]. Según los términos de la Convención, el BIPM funciona bajo la vigilancia exclusiva del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), el mismo bajo la autoridad

de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), que elige los miembros de CIPM y reúne de manera periódica a los representantes de los gobiernos de los estados miembros. [22]

La Convención del Metro, dispuso la utilización del metro y del kilogramo, y en la década del 60 la estandarización con el Sistema Internacional de Unidades (SI), que aunque se ha generalizado en el orbe, aún hoy enfrenta a múltiples sistemas locales o regionales de medición y otros retos [23]. Otra organización intergubernamental que se ocupa específicamente de Metrología es la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), con la cual mantienen estrechos vínculos el BIPM y el CIPM. La OIML fue fundada en 1955 [24], con la finalidad de suministrar una base común internacional para la elaboración de las leyes y reglamentos nacionales ligados con la metrología [25].

La amplia necesidad del reconocimiento internacional de las diferentes infraestructuras metrológicas de los países, ha conllevado a nuevas redes de cooperación internacional y organizaciones intergubernamentales, ejemplo de ello es el hecho de que el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), ha firmado Memorándums de Entendimiento (MoUs) o Acuerdos con la Organización Mundial de la Salud (WHO), Organización Mundial de la Meteorología (WMO), Federación Internacional para la Química Clínica y Laboratorios de Medicina (IFCC) y la Comisión Internacional para la Acreditación de Laboratorios (ILAC). [21]

Un hito en el Sistema Metrológico Internacional es el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MRA) del CIPM firmado por los directores de los Institutos Nacionales de Metrología miembros de la Convención del Metro, a partir del año 1999. El CIPM-MRA tiene como objetivo establecer el grado de equivalencia de los patrones nacionales de los Institutos Nacionales de Metrología, así como de proveer las bases para el reconocimiento de los certificados de calibración y de medición que ellos emiten. Y a través de esto, poner a disposición de los gobiernos y de otras partes interesadas bases técnicas fundamentadas para acuerdos relacionados al

comercio internacional y regulaciones. [26] [27] [28]

Los Institutos Nacionales de Metrología de América se organizan bajo el Sistema Interamericano de Metrología (SIM), compuesto por las sub-regiones: NORAMET, CARIMET, CAMET, ANDIMET, y SURAMET. [26]. Cuba por problemas del bloqueo no forma parte de ninguna de ellas, incorporándose al Sistema Europeo de Metrología COOMET.

Los pilares básicos en que se fundamenta la metrología en las diversas áreas, en cuanto, a su estudio y aplicación son: la metrología científica, la industrial y la legal, figura 1.2.

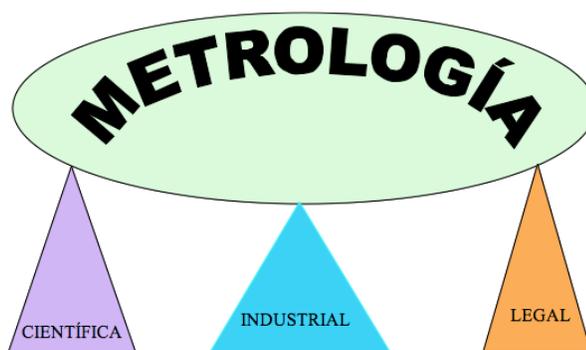


Figura 1.2. Pilares básicos en que se fundamenta la Metrología.

La Metrología Legal es el conjunto de procedimientos legislativos, administrativos, y técnicos establecidos por las autoridades públicas, o por referencia a ellos, para especificar y asegurar, de acuerdo con los contratos o las regulaciones establecidas, la apropiada calidad y credibilidad de las mediciones realizadas en controles oficiales, en el comercio, la salud, la seguridad y el medioambiente. [29]

Es la parte de la metrología que trata de las unidades de medida, métodos de medición e instrumentos de medición, en relación a las exigencias técnicas y requerimientos legales que tienen el objetivo de asegurar la garantía pública desde el punto de vista de la seguridad y de la apropiada exactitud de las mediciones. [9].

El alcance de la metrología legal depende de las reglamentaciones nacionales y

puede variar de un país a otro.

La Metrología Industrial es la parte de la metrología que está dirigida a la industria, al objeto de mantener la medida trazable a patrones Nacionales ó Internacionales, de forma que se pueda mantener así la comunicación e intercambio de las tecnologías y las ciencias. Esta se desarrolla a través de laboratorios de calibración especializados en las diversas áreas metrológicas. [30] Es la metrología relativa a las mediciones destinadas a asegurar la conformidad con especificaciones de diseño o proceso necesarios para algún objeto con respecto al uso previsto. Esta disciplina se centra en las medidas aplicadas a la producción y el control de la calidad. Materias típicas son los procedimientos e intervalos de calibración, el control de los procesos de medición y la gestión de los equipos de medida. La metrología industrial ayuda a la industria en su producción.

La Metrología Científica se encarga del estudio de las mediciones realizadas con la finalidad de validar teorías científicas ya creadas o para sugerir nuevas teorías. Se ocupa de los problemas teóricos y prácticos relacionados con las unidades de medida, del problema de los errores en la medida, de las propiedades metrológicas de los instrumentos de medidas aplicables independientemente de la magnitud involucrada. [30]

De igual forma que la metrología se ha ido desarrollando a nivel mundial creando su historia, en Cuba, existe una evolución de esta ciencia, marcada por el triunfo revolucionario.

1.3. La metrología en Cuba

Antes del triunfo de la Revolución, no existía ninguna estructura organizativa por parte del Estado para el control de las actividades metrológicas, sólo se ejecutaban algunas acciones aisladas de Control Metrológico, fundamentalmente en las áreas vinculadas al comercio. [21]

Desde los primeros años de la Revolución Cubana, sus principales líderes se preocuparon por el desarrollo científico técnico del país y por la creación y

utilización del conocimiento a partir del talento nacional. [31]

Un papel importante en el desarrollo de la metrología en Cuba lo desempeñó la extraordinaria visión del Comandante Ernesto (Che) Guevara, desde su puesto de Ministro de Industrias y en la cruzada que siempre mantuvo porque la calidad fuera la medida de todas las producciones y servicios del país; comenzaron a darse los primeros pasos en la formación de personal especializado en metrología. [23].

En noviembre de 1964, con la ayuda de la asesoría técnica de expertos de la República Democrática Alemana y de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, se funda el primer Laboratorio de Metrología en el Ministerio de Industrias; en el año 1973 formó parte del Instituto Cubano de Normalización, Metrología y Control de la Calidad (ICNMCC) y en 1976 se convierte en Comité Estatal de Normalización (CEN). En este período, el campo de la Metrología que más se había desarrollado era el de la Industrial, este servicio primó sobre la Metrología Legal y la Metrología Científica. [21].

En el año 1982, se aprobó el Decreto Ley No. 62 sobre el Sistema Internacional de Unidades (SI), comenzando así el desuso gradual de las unidades que no pertenecen al SI, según programas de implantación elaborados por los Organismos de la Administración Central del Estado.

Comenzó a desarrollarse una red nacional de laboratorios de organismos y empresas y en la década de los años 90 estos laboratorios comenzaron a aplicar el Sistema de Gestión de la Calidad basado en NC ISO/IEC Guía 25, actualmente NC ISO/IEC 17025, que les permitiera la presentación de evidencias de su competencia técnica con vistas a la Acreditación de los mismos [21]. Se crea en Cuba el Órgano Nacional de Acreditación de la República de Cuba (ONARC), que es el encargado de llevar a cabo el proceso de acreditación de dichos laboratorios.

En Cuba la metrología no se ha mantenido estable; y se vio muy deprimida en los años del período especial, por la poca importancia a ella atribuida, la tendencia de

muchas empresas a eliminar a los metrologos de sus plantillas, asumiendo cualquier persona la actividad sin la preparación adecuada, unido a la escasez de recursos existente en ese período.

La expulsión de Cuba del Sistema Interamericano de Metrología, en la década de los 90 del pasado siglo, fue una de las primeras agresiones contra ese tipo de aseguramiento "que obligó al país a trabajar en la comisión de metrología de Europa del Este, para poder defender las capacidades de medición y ejercerla de manera legal" , con un gran impacto negativo en lo económico, pues por un lado las reuniones a las que deben asistir los expertos cubanos se han encarecido dada la distancia geográfica entre Cuba y esas naciones, y por otro, son pocas las oportunidades para adquirir patrones de alta exactitud. [32]

La apertura al capital extranjero y el empleo de nuevas sociedades económicas, imponen la necesidad de regular legalmente mediante el uso de un Decreto Ley, todo lo relacionado con la organización del Sistema Metrológico, así como lo relativo a la Metrología Legal. Con el Decreto Ley 183 de la Metrología (DL-183) puesto en vigor desde 1998 el Instituto de Investigaciones en Metrología, adquiere carácter Nacional, denominándose "Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología" INIMET. [21].

En el año 2002 el Servicio Nacional de Metrología es personificado con el nombre de SENAMET e incrementó la participación activa del INIMET ante el Órgano Regional de Metrología al que pertenece (COOMET), trazándose políticas de comparación internacionales que permitan demostrar su reconocida competencia y promoviendo ensayos de aptitud a los laboratorios nacionales acreditados. En ese mismo año se crea una Cátedra de Metrología en el Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas. [21]

Para dar cumplimiento al DL:183 la Oficina Nacional de Normalización dicta una serie de disposiciones generales (DG), entre ellas se tienen al DG-01:2012, relativa al cumplimiento de la metrología legal y el DG09: 2012, para garantizar la supervisión metrológica. [33] [34]

Para un país como Cuba, el impacto de la metrología toma dimensiones relevantes por ser determinante en el apoyo a las tareas en que está enfrascada la nación para actualizar su modelo económico, como contribución a elevar la competitividad de la gestión empresarial y la calidad de vida de la población. [35]

En todos los sectores, con diferentes alcances y visualizaciones, se han establecido programas y políticas para el fortalecimiento y desarrollo de sus infraestructuras ramales de metrología, con plena conciencia de que para alcanzar sus objetivos de desarrollo y sostenibilidad es imprescindible garantizar que sus mediciones sean confiables y seguras. [35]

1.4. Definiciones básicas en metrología.

Todas las ramas de la ciencia y la tecnología necesitan escoger su vocabulario con cuidado. El Grupo de Metrología de la ISO, decidió proponer a las cuatro principales organizaciones internacionales que se ocupan de la metrología (BIPM, IEC, ISO, OIML) realizar una acción conjunta para elaborar una terminología común, surgiendo así el vocabulario internacional de metrología, adoptado por nuestro país como Norma Cubana.

En la NC OIML V2:2012 [7] se definen los términos fundamentales utilizados en metrología, que serán los que se utilizaran en este trabajo. Para los términos no recogidos en este documento se citará la fuente.

- Medición (medida): proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

Cuando se mide una magnitud física es necesario determinar cuan próximo está el "valor medido" del "valor verdadero".

- Valor medido de una magnitud: valor de una magnitud que representa un resultado de medida.
- Valor verdadero de una magnitud: valor de una magnitud compatible con la definición de la magnitud.

En la práctica el valor verdadero de una magnitud es imposible de conocer en la

descripción de la medida. Existe una cantidad de detalles incompletos inherentes a la definición de una magnitud, no existe un único valor verdadero compatible con la definición, sino más bien un conjunto de valores verdaderos compatibles con ella, en principio, imposibles de conocer en la práctica. Durante la realización de una medida intervienen una serie de factores que determinan su resultado, son ellos:

- El mensurando.
- El procedimiento de medida.
- Los instrumentos de medida.
- El ambiente de medición.
- El observador.
- El método de cálculo.

Una medición comienza con una especificación apropiada del mensurando, del método de medida y del procedimiento de medida, definiéndose estos términos como:

- Mensurando: magnitud que se desea medir.
- Procedimiento de medida: descripción detallada de una medida conforme a uno o más principios de medida y a un método de medida dado, basado en un modelo de medida y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medida.
- Principio de medida: fenómeno que sirve como base de una medida.
- Método de medida: descripción genérica de la secuencia lógica de operaciones utilizadas en una medida, y como se ejecuta.
- Resultado de medida: conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Para caracterizar cualitativamente la calidad de una medición se utiliza el término exactitud.

- Exactitud de medida: la proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.

Se puede decir que la exactitud como cualidad de una medida tiene dos componentes fundamentales:

$$\text{Exactitud} = \text{Veracidad} + \text{precisión.} \quad (1.1)$$

- Precisión de medida: es la proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.
- Veracidad de medida: proximidad entre la media de un número infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia. No es una magnitud y no puede expresarse numéricamente. Está inversamente relacionada con el error sistemático, pero no está relacionada con el error aleatorio.

Por lo que el término "precisión de medida" no debe utilizarse en lugar de "exactitud de medida", ya que esta última incluye ambos conceptos.

En la figura 1.3 se muestran de forma esquemática los conceptos de precisión y exactitud. Los centros representan el valor verdadero y los puntos el resultado de mediciones repetidas con un instrumento de medida. La dispersión de los puntos da una idea de la precisión, mientras que la proximidad al centro da fe de la exactitud. En la figura 1.3 (a) se aprecia una determinación precisa pero inexacta, en (b) muy exacta y muy precisa, y en (c) inexacta y menos precisa que (a) y (b).

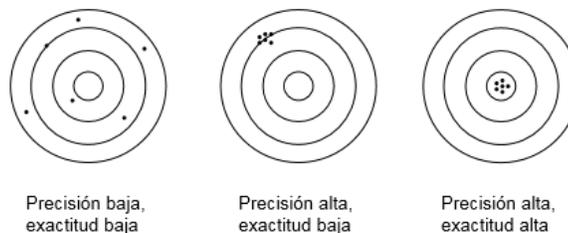


Figura 1.3. Ilustración de los conceptos de exactitud y precisión

- 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. 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.

Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente “autocalibración”, ni con una verificación de la calibración.

- 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.
- Instrumento de medida: dispositivo utilizado para realizar mediciones, solo o asociado a uno o varios dispositivos suplementarios.

Un instrumento de medida que puede utilizarse individualmente es un sistema de medida. Un instrumento de medida puede ser un instrumento indicador o una medida materializada.

- Instrumento indicador: instrumento de medida que produce una señal de salida con información sobre el valor de la magnitud medida. Ejemplos: voltímetro, micrómetro, termómetro, balanza electrónica, etc.

Un instrumento indicador puede proporcionar un registro de su indicación.

La señal de salida puede mostrarse en forma visual o acústica. También puede transmitirse a uno o a más dispositivos.

- Intervalo de medida: conjunto de los valores de magnitudes de una misma naturaleza que un instrumento o sistema de medida dado puede medir con una

incertidumbre instrumental especificada, en unas condiciones determinadas

En ciertas magnitudes, se utilizan los términos "rango de medida" o "campo de medida".

No debe confundirse el límite inferior de un intervalo de medida con el límite de detección de dicho instrumento.

- Deriva instrumental: variación continua o incremental de una indicación a lo largo del tiempo, debida a variaciones de las características metrológicas de un instrumento de medida.
- Sistema de medida: conjunto de uno o más instrumentos de medida y, frecuentemente, otros dispositivos, incluyendo reactivos e insumos varios, ensamblados y adaptados para proporcionar valores medidos dentro de intervalos especificados, para magnitudes de naturalezas dadas.

Un sistema de medida puede estar formado por un único instrumento de medida.

- Cadena de medida: serie de elementos de un sistema de medida que constituye la trayectoria de la señal, desde el sensor hasta el elemento de salida. Ejemplos: cadena de medida electro-acústica compuesta por micrófono, atenuador, filtro, amplificador y voltímetro; cadena de medida mecánica compuesta por tubo Bourbon, sistema de palancas, engranajes, y un dial.
- Sensor: elemento de un sistema de medida directamente afectado por la acción del fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a medir. Ejemplos: bobina sensible de un termómetro de resistencia de platino, rotor de la turbina de un medidor de flujo, tubo *Bourdón* de un manómetro, flotador de un instrumento medidor de nivel, célula fotoeléctrica de un espectrofotómetro, cristal líquido termo-trópico que cambia su color en función de la temperatura.

En algunos campos se emplea el término "detector" para este concepto.

- Transductor de medida: dispositivo utilizado en medición, que hace corresponder a una magnitud de entrada una magnitud de salida, según una relación determinada. Ejemplos: termopar, transformador de corriente, galga o

banda extensométrica, electrodo para pH, tubo *Bourdón*, lámina bimetálica, etc.

- Resolución de un dispositivo visualizador: mínima diferencia entre indicaciones visualizadas, que puede percibirse de forma significativa.
- Zona muerta: intervalo máximo dentro del cual se puede hacer variar en los dos sentidos el valor de la magnitud medida, sin causar una variación detectable de la indicación correspondiente.

La zona muerta puede depender de la velocidad de la variación.

- Histéresis: Es la propiedad de un dispositivo o instrumento de dar valores diferentes respecto a su valor de entrada dependiendo de la dirección en que los valores de la entrada han sido aplicados. [15]

Se determina como la diferencia de los resultados de las pruebas en ascenso y descenso para un mismo valor de entrada.

- Clase de exactitud: clase de instrumentos o sistemas de medida que satisfacen requisitos metrológicos determinados destinados a mantener los errores de medida o las incertidumbres instrumentales dentro de límites especificados, bajo condiciones de funcionamiento dadas.

En general, todo procedimiento de medida tiene imperfecciones que dan lugar a un error en el resultado de la medición, lo que provoca que este último sea sólo una aproximación o estimado del valor del mensurando.

- Error de medida: diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia. [36]

La falta de exactitud de un sistema de medida se puede explicar en función de los errores que se generan en los instrumentos y en el acto mismo de medir. Tradicionalmente el error se ha considerado constituido por dos componentes, una componente aleatoria y una componente sistemática. [37]

- Error sistemático: componente del error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible. [7]

El valor de referencia para un error sistemático es un valor verdadero, un valor medido de un patrón cuya incertidumbre de medida es despreciable, o un valor convencional. El error sistemático y sus causas pueden ser conocidas o no. Para compensar un error sistemático conocido puede aplicarse una corrección.

El error sistemático es igual a la diferencia entre el error de medida y el error aleatorio.

Se asume que, tras la corrección, la esperanza matemática del error debido al efecto sistemático es igual a cero. [37]

- Error aleatorio: componente del error de medida que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible.

El valor de referencia para un error aleatorio es la media que se obtendría de un número infinito de mediciones repetidas del mismo mensurando.

Los errores aleatorios de un conjunto de mediciones repetidas forman una distribución que puede representarse por su esperanza matemática, generalmente nula, y por su varianza. El error aleatorio es igual a la diferencia entre el error de medida y el error sistemático.

Los efectos de tales variaciones (efectos aleatorios) dan lugar a variaciones en observaciones repetidas del mensurando. [37] El error aleatorio no puede compensarse mediante correcciones, pero puede reducirse aumentando el número de mediciones bajo las mismas condiciones (condiciones de repetibilidad), esto significa que no cambia ninguno de los factores que intervienen en la medición, es decir: el mismo mensurando, el mismo observador, el mismo instrumento de medida, el mismo lugar y la repetición de la medida en un corto intervalo de tiempo. Su esperanza matemática o valor esperado es igual a cero.

La desviación estándar experimental de la media aritmética de una serie de observaciones no es el error aleatorio de la media, aunque se designe así en algunas publicaciones. Se trata de una medida de la incertidumbre de la media, debido a los efectos aleatorios. Es imposible conocer el valor exacto del error de la

media, debido a esos efectos. [37]

- Error máximo permitido: valor extremo del error de medida, con respecto a un valor de referencia conocido, permitido por especificaciones o reglamentaciones, para una medición, instrumento o sistema de medida dado.

En general, los términos “errores máximos permitidos” o “límites de error” se utilizan cuando existen dos valores extremos. No es conveniente utilizar el término «tolerancia» para designar el “error máximo permitido”.

- 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.
- Evaluación tipo A de la incertidumbre de medida: evaluación de una componente de la incertidumbre de medida mediante un análisis estadístico de los valores medidos obtenidos bajo condiciones de medida definidas.
- Evaluación tipo B de la incertidumbre de medida: evaluación de una componente de la incertidumbre de medida de manera distinta a una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida. Ejemplos, evaluación basada en informaciones:
 - asociadas a valores publicados y reconocidos;
 - asociadas al valor de un material de referencia certificado;
 - obtenidas a partir de un certificado de calibración;
 - relativas a la deriva;
 - obtenidas a partir de la clase de exactitud de un instrumento de medida verificado;
 - obtenidas a partir de los límites procedentes de la experiencia personal.
- Incertidumbre estándar: incertidumbre de medida expresada como una desviación estándar.
- Incertidumbre estándar combinada: incertidumbre estándar obtenida a partir de las incertidumbres estándares individuales asociadas a las magnitudes de entrada de un modelo de medida.
- Incertidumbre estándar relativa: cociente entre la incertidumbre estándar y el

valor absoluto del valor medido.

- Contribuciones a la incertidumbre: declaración de una incertidumbre de medida y las componentes de esa incertidumbre, junto con su cálculo y combinación.
- Incertidumbre expandida: producto de una incertidumbre estándar combinada y un factor mayor que uno. El factor depende del tipo de distribución de probabilidad de la magnitud de salida en un modelo de medida y de la probabilidad de cobertura elegida.

El factor que interviene en esta definición es el factor de cobertura.

- Factor de cobertura: número mayor que uno por el que se multiplica una incertidumbre estándar combinada para obtener una incertidumbre expandida. Habitualmente se utiliza el símbolo “k” para el factor de cobertura.
- Diagrama de calibración: expresión gráfica de la relación entre una indicación y el resultado de medida correspondiente. Otras expresiones de la relación pueden ser una curva de calibración con las incertidumbres de medida asociadas, una tabla de calibración, o un conjunto de funciones.

Este concepto se refiere a una calibración cuando la incertidumbre instrumental es grande en comparación con las incertidumbres de medida asociadas a los valores de los patrones.

Se define además “Variable”: como la cantidad o condición cuyo valor está sujeto a cambio y puede usualmente ser medido (ejemplo, temperatura, razón de flujo, velocidad, señal, etc). [15]

- Confirmación metrológica: Conjunto de operaciones requeridas para asegurarse de que el instrumento de medida es conforme a los requisitos correspondientes para el uso previsto. [6]

La confirmación metrológica generalmente incluye la calibración y/o verificación, cualquier ajuste o reparación necesario, y la subsiguiente re-calibración, la comprobación con los requisitos metrológicos del uso del instrumento de medida,

así como cualquier sellado y etiquetado requerido. [38]

La confirmación metrológica no se logra hasta que se haya demostrado y documentado la adecuación del instrumento de medida para el uso previsto. Los requisitos para el uso previsto incluyen consideraciones tales como alcance, resolución y error máximo permitido, esto se comprueba mediante el proceso de verificación, mediante el cual son comparados los resultados del proceso de calibración del instrumento de medida con los requisitos metrológicos que exige el proceso. O sea que se corresponde la capacidad de medición requerida con la instalada. [39]

La denominada Capacidad de Medición Requerida (CMR) por una aplicación específica, debe determinarse considerando al menos cuatro diferentes fuentes: requisitos normativos, requisitos legales, requisitos técnicos y requisitos de control estadístico.

1.5. Términos y conceptos estadísticos básicos utilizados en metrología

Las variables que caracterizan a los fenómenos que afectan al proceso de medición se denominan variables aleatorias. Esto hace que el resultado de la medición sea una variable aleatoria. [40]

En este sentido se define una variable aleatoria, como aquella variable que puede tomar cualquiera de los valores de un conjunto determinado de valores, y a la que se asocia una distribución de probabilidad. [37].

Una variable aleatoria es una función que asocia un número real a cada elemento dentro del conjunto de resultados posibles de un experimento. Pueden ser clasificadas como variables aleatorias discretas y variables aleatorias continuas [37], las discretas son aquellas que pueden tomar únicamente valores aislados (se pueden contar el conjunto de resultados posibles) y las continuas son aquellas que pueden tomar cualquiera de los valores de un intervalo finito o infinito (los datos que se miden). El resultado de la medición como variable aleatoria es una variable aleatoria continua. [40]

Dentro de las principales propiedades de las variables aleatorias continuas se encuentra que a pesar del carácter aleatorio de los resultados de las observaciones individuales repetidas bajo las mismas condiciones en un proceso de medición, en ellos aparece una ley determinada que expresa una regularidad dada y que lleva el nombre de estabilidad estadística. Toda variable aleatoria responde a una cierta ley de distribución que se expresa a través de las denominadas funciones de distribución.

En este sentido se puede mencionar que existen las siguientes funciones de distribución:

1. Función de Distribución Gaussiana.
2. Función de Distribución Rectangular.
3. Función de Distribución Triangular.

En el anexo A, se muestran de manera detallada, las características y principales elementos estadísticos asociados a cada una de ellas.

Teorema del límite central: Si $Y = c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_nX_n = \sum_{i=1}^n c_i * X_i$, y todas las X_i vienen caracterizadas por distribuciones normales, la distribución de "Y", resultante de la convolución, también es normal. No obstante, aunque las distribuciones de X_i no sean normales, es posible suponer una distribución normal para "Y", teniendo en cuenta el Teorema del Límite Central. Este teorema establece que la distribución de Y será aproximadamente normal, con esperanza matemática $E(Y) = \sum_{i=1}^n c_i * E(X_i)$ y varianza $\sigma^2(Y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 * \sigma^2(X_i)$ donde $E(X_i)$ es la esperanza matemática de X_i y $\sigma^2(X_i)$ es la varianza de X_i , siempre que las X_i sean independientes y $\sigma^2(Y)$ sea mucho mayor que cualquier otra componente $c_i^2 \sigma^2(X_i)$ de una X_i cuya distribución no sea normal. [41],

Cuando se combinan las fuentes de incertidumbres con sus respectivas distribuciones para obtener la incertidumbre combinada del mensurando, el Teorema del Límite Central permite aproximar la distribución resultante por una distribución normal. La aproximación será mejor mientras más grande sea el

número de fuentes de incertidumbres y sus contribuciones sean similares, independientemente de la forma particular de sus distribuciones [42].

La hipótesis de una distribución normal no siempre puede confirmarse experimentalmente con facilidad. Sin embargo, cuando varias componentes de la incertidumbre (por ejemplo, tres), derivadas de distribuciones de probabilidad bien definidas de magnitudes independientes (por ejemplo, distribuciones normales o rectangulares), realizan contribuciones comparables a la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida, se cumplen las condiciones del Teorema Central del Límite y puede suponerse, con un elevado grado de aproximación, que la distribución de la estimación de salida es normal. [43]

La suma de varias cantidades con funciones de distribuciones diferentes, pero de igual amplitud, que no estén correlacionadas, tiene por resultado aproximadamente una distribución normal. En cambio a la suma de dos cantidades a las cuales se les asignan distribuciones rectangulares con límites diferentes (a_1, b_1 y a_2, b_2) da como resultado una distribución trapezoidal (a, b, β); pero si los límites son iguales se tiene por resultado una distribución triangular (a, b). [42]

El conocimiento de estos conceptos, por sí solo, no constituye la única esencia para desarrollar de manera eficaz el proceso de calibración, sino que es necesario contar con el personal capacitado en los métodos de medición, familiarizado con los instrumentos de medida a utilizar y los procedimientos de trabajo e instrucciones de calibración. Los aspectos generales aquí tratados, constituyen la base para el tema a tratar en los capítulos subsiguientes.

1.6. Los instrumentos de medidas y sus errores

Son varias las causas de los errores de medición, citados por varias fuentes y autores, entre ellas [44] [40] [45] :

a) Errores instrumentales: La primera fuente de error es la propia limitación de los instrumentos de medida que se utilizan, los cuales se pueden considerar de dos

tipos fundamentales:

- Los errores que se determinan en el proceso de calibración del instrumento, los cuales son debidos al propio diseño estructural del instrumento de medida, a las propiedades de los materiales que lo componen, a imperfecciones en la tecnología de su fabricación y al envejecimiento de sus partes componentes durante el proceso de su explotación.

De acuerdo a la exactitud prevista en la medición, estos errores instrumentales pueden disminuirse en gran medida, introduciendo las correcciones correspondientes reportadas en su certificado de calibración.

De hecho, todo instrumento de medida debe ser calibrado periódicamente, ya que de otra forma no se puede asegurar si las lecturas proporcionadas por el mismo son o no correctas.

- Errores que surgen a consecuencia de la influencia del instrumento de medida sobre las propiedades del objeto o fenómeno que se mide. Tales situaciones surgen, por ejemplo, al medir la longitud cuando el esfuerzo de medición del instrumento utilizado es demasiado grande, al registrar procesos que ocurren con rapidez con equipos que funcionan insuficientemente rápido; al medir la temperatura con termómetros de líquido o de gases, etc. En especial esto debe tenerse en cuenta en los instrumentos eléctricos y electrónicos, puestos que estos para producir una indicación, precisan energía que ha de ser proporcionada por el circuito donde se realiza la medición.

Aunque la calidad de un instrumento está relacionada con los errores que produce, estos también dependen de la forma en que sean utilizados. Por tanto, se recomienda conocer lo mejor posible las características de un instrumento antes de utilizarlo. Si no se cumplen los requisitos establecidos en el manual técnico del instrumento de medida dado, tales como condiciones nominales de funcionamiento, tiempo de precalentamiento, correcta instalación, etc., el error de medida puede ser bastante mayor que el esperado.

b) Errores de método: Los errores de método, también denominados errores teóricos, son los debidos a la imperfección del método de medida. Entre estos se pueden señalar los siguientes:

- Errores que son la consecuencia de ciertas aproximaciones al aplicar el principio de medición y considerar que se cumple una ley física determinada o al utilizar determinadas relaciones empíricas.

Un ejemplo típico de este tipo de error es el de la medición de una resistencia eléctrica con amperímetro y voltímetro al considerar que el cociente entre la caída de potencial medida por el voltímetro y la intensidad de la corriente medida por el amperímetro, es igual a la resistencia eléctrica del dispositivo dado. En este caso de hecho se está considerando que la impedancia interna del voltímetro es infinita y del amperímetro es cero, pero éstas serán aproximaciones suficientemente buenas sólo en dependencia del valor de la resistencia medida y de la exactitud con que se requiera medir su valor.

- Errores del método que surgen al extrapolar la propiedad que se mide en una parte limitada del objeto de medición al objeto completo, si éste no posee homogeneidad de la propiedad medida. Por ejemplo, cuando se determina la densidad de una sustancia a partir de la masa y el volumen de una muestra que contenía cierto grado de impurezas y el resultado se considera que caracteriza a la sustancia dada.

c) Errores debido a agentes externos: Los agentes externos que actúan en el proceso de medición se pueden clasificar en dos grupos:

- Factores ambientales: Tanto la magnitud a medir como la respuesta de los instrumentos de medida, dependen en mayor o menor grado de las condiciones ambientales en que el proceso se lleva a cabo. Como variables ambientales se puede citar la temperatura, la humedad, la presión y las corrientes de aire. La primera es sin duda la más significativa.
- Presencia de señales o elementos parásitos. Los elementos parásitos que generalmente se presentan al efectuar una medición, pueden ser de dos tipos:

1. Los que inciden sobre la medición de forma errática, perturbando las condiciones de equilibrio del sistema de medida y disminuyendo su exactitud. Por ejemplo, vibraciones mecánicas, corrientes de aire, zumbidos de la red eléctrica, señales de radiofrecuencia, etc. Estas señales perturbadoras producen en ciertos casos un ruido de fondo en la respuesta de los instrumentos electrónicos, o hacen inestable el dispositivo de lectura cuando hay partes mecánicas móviles, produciendo efectos aleatorios y aumentando la incertidumbre de la medida.

2. Agentes físicos de igual naturaleza que la de la magnitud a medir que se hallan presentes de modo prácticamente constante. Por ejemplo, campos electrostáticos o magnetostáticos (como puede ser el campo magnético terrestre), fuerzas electromotrices termoeléctricas o de contacto presentes en una instalación de medición, etc.

d) Errores debidos al observador. En los errores debido al observador se pueden señalar:

- Errores de paralaje o de interpolación visual al leer en la escala de un instrumento.
- Errores debido a un manejo equivocado del instrumento.
- Omisión de operaciones previas o durante la medición, como puede ser un ajuste a cero, tiempo mínimo de precalentamiento, etc.

e) Errores matemáticos. Frecuentemente con los datos de las mediciones es necesario realizar determinados cálculos para obtener el resultado final. Por tanto, otra fuente de error son los errores matemáticos debidos por ejemplo al empleo de fórmulas inadecuadas, el redondeo de las cantidades, etc. Equivocaciones a la hora de registrar o analizar los datos observados. [37]

Los valores exactos de las contribuciones al error de la medición debido a variaciones aleatorias en las observaciones (efectos aleatorios), determinación inadecuada de correcciones por efectos sistemáticos y conocimiento incompleto de ciertos fenómenos físicos (que son también efectos sistemáticos) son desconocidos y no se pueden conocer, por el carácter aproximado de nuestro

conocimiento o por su propia naturaleza, pero las incertidumbres asociadas con estos efectos aleatorios y sistemáticos que dan lugar al error, pueden ser evaluadas. [44]

1.7. La calibración

En el proceso de calibración usualmente se establece una comparación entre las exactitudes del instrumento o sistema de medida que se calibra y el instrumento de medida de mayor exactitud utilizado como patrón. La relación entre las exactitudes de ambos dispositivos de medidas es conocida como: Relación de Exactitud de Prueba (TAR); pero esta razón no considera otras fuentes de error que están presentes en el proceso de calibración, tales como influencia de las condiciones ambientales, errores de métodos, errores de apreciación, etc. Esos errores se identifican y cuantifican mediante el cálculo de la incertidumbre, y a la relación entre incertidumbre del sistema o instrumento de medida que se calibra y el instrumento que funge como patrón, calculadas ambas para el mismo nivel de confianza se le denomina TUR, y se calcula según (1.2). [46].

$$TUR = \frac{\text{Incertidumbre del instrumento a calibrar}}{\text{Incertidumbre del instrumento patrón}} \quad (1.2)$$

Los laboratorios deben asegurar que la incertidumbre de calibración sea lo suficientemente pequeña para que no afecte la medición. Las crecientes exigencias de calidad imponen la utilización de tolerancias cada vez más pequeñas. Para garantizar una calibración certera el TUR debe ser por lo menos 4, aunque este valor puede variar dependiendo de la fiabilidad. Estadísticamente se puede demostrar, que con un TUR de 4, la probabilidad de dar un válido un instrumento de medida que realmente está fuera de especificación es tan sólo de 0,15 %. [46]. La relación TUR proporciona un buen criterio a la hora de seleccionar el instrumento adecuado para una medida y de este modo garantizar la CMR adecuada.

La forma de interpretar la relación TUR en un proceso de medida, entre la tolerancia del proceso y la incertidumbre expandida con que se deben realizar las

mediciones es: [45], [47]

$$3 \leq \frac{T}{2U} \leq 10 \quad (1.3)$$

Con frecuencia no es posible operar con intervalos de incertidumbre diez veces inferiores al de tolerancia. Por ello en estos casos, hay que trabajar con relaciones $T/2U$ inferiores a diez, aunque no es recomendable bajar de valores inferiores a tres o cuatro, ya que entonces se estarían adoptando demasiadas decisiones erróneas, es decir, se rechazarían demasiados valores admisibles porque el método de medida empleado no posee la calidad suficiente para el criterio de conformidad impuesto. Esta es la justificación de la acotación [48]. Valores más altos que diez supondrían aumentos exponenciales en el costo económico ligado a la realización de las medidas. Sin embargo, valores de esta relación inferiores a tres supondrían que la reducción en la longitud del intervalo de aceptación sería muy alta [45], esto indica que los métodos de medida que se están utilizando carecen de la calidad requerida. Ver figura 1.4.

El resultado de cada medición realizada en un proceso de medición se ve influenciado por un gran número de factores que varían durante el proceso de medición de forma incontrolada (aleatoria). El análisis y tratamiento de estos fenómenos se basa en procesamientos estadísticos.

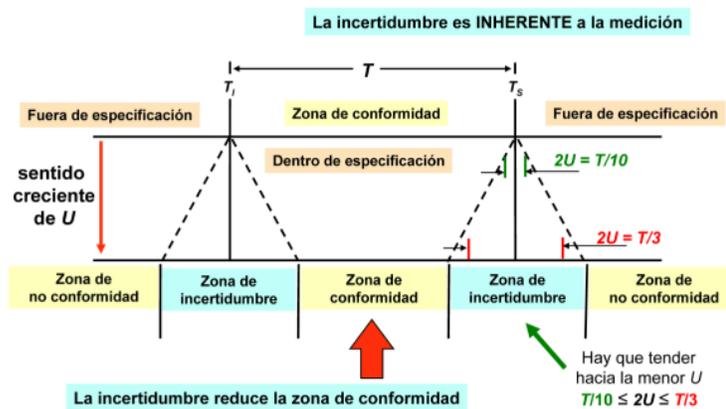


Figura 1.4. Disminución de la zona de conformidad respecto al intervalo de tolerancia, con el aumento de la incertidumbre de medida.

1.8. La incertidumbre de las mediciones

El concepto de incertidumbre como atributo cuantificable es relativamente nuevo en la historia de la medición. Actualmente está ampliamente reconocido que aun cuando se hayan considerado todas las componentes conocidas o sospechadas del error, y se hayan aplicado las correcciones oportunas, existe una incertidumbre asociada a la corrección del resultado final; esto es una duda acerca de la bondad con que el resultado final representa al valor de la magnitud medida. [37]

La incertidumbre de medida es una forma de expresar el hecho de que, para un mensurando y su resultado de medición dados, no hay un sólo valor, sino un número infinito de valores dispersos alrededor del resultado, que son consistentes con todas las observaciones, datos y conocimientos que se tengan del mundo físico, y que con distintos grados de credibilidad pueden ser atribuidos al mensurando. [44]

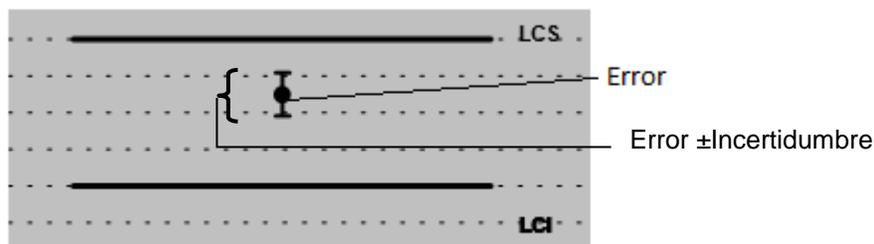


Figura 1.5. Representación gráfica del error en un punto de medición y la incertidumbre asociada a esa medición.

El resultado de una medición no está completo sino posee una declaración de la incertidumbre de medida con un nivel de confianza determinado [40]. A la hora de expresar el resultado de una medición de una magnitud física, es obligatorio dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, como se muestra en la figura 1.5, de modo que quienes utilicen dicho resultado puedan evaluar su idoneidad. Sin dicha indicación las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas [37].

La incertidumbre es un índice de calidad de la medida, de forma que menores incertidumbres suponen mayor calidad de los resultados de medida, admitiendo que las incertidumbres se han obtenido mediante procedimientos similares. [48].

Se tiene gran cuidado en distinguir entre los términos “error” e “incertidumbre”. No son sinónimos, sino que representan conceptos completamente diferentes. Por tanto, no deben ser confundidos entre sí o utilizados inadecuadamente, uno en lugar del otro. [37]

Los componentes de la incertidumbre de la medición se muestran en la figura 1.6, ellos se componen de las desviaciones aleatorias y de los errores sistemáticos desconocidos. [49]

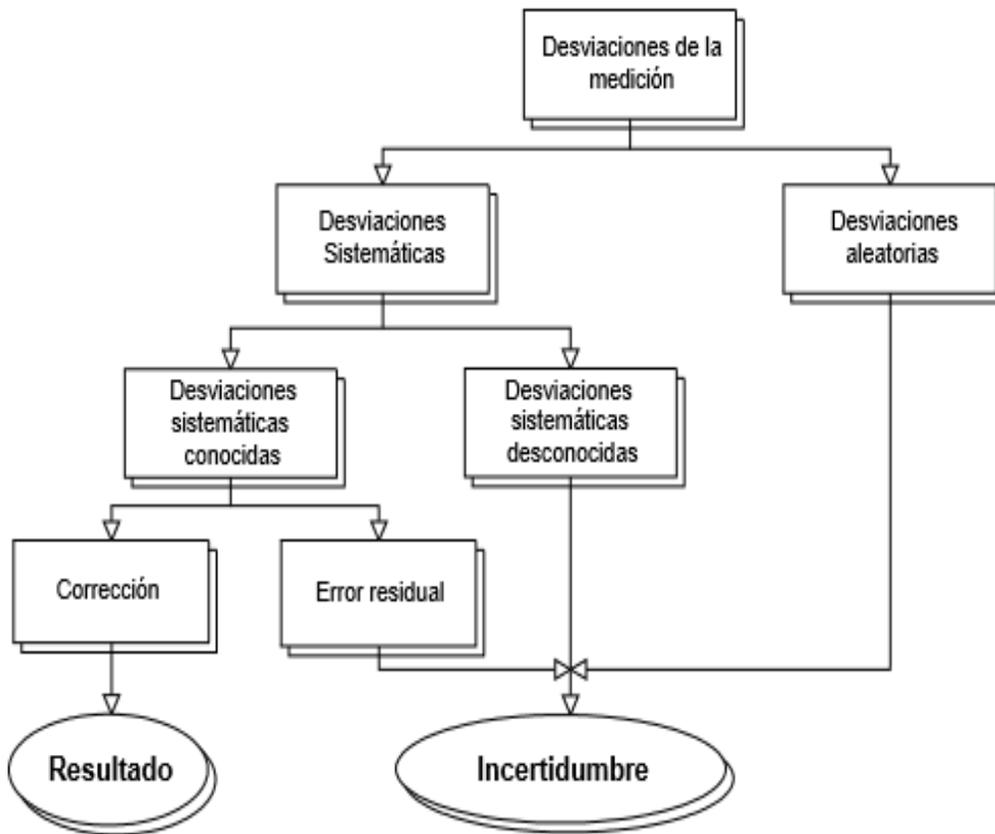


Figura 1.6. Desviaciones sistemáticas y aleatorias de la medición.

De la misma manera que la utilización casi universal del Sistema Internacional de Unidades (SI) [50], ha dado coherencia a todas las mediciones científicas y tecnológicas, un consenso internacional sobre la medición y expresión de la incertidumbre de medida permite dar significado a una gran variedad de resultados de medida en los campos de la ciencia, la ingeniería y la reglamentación, es imprescindible que el método de evaluación y expresión de la incertidumbre sea uniforme en todo el mundo, de manera que las mediciones realizadas en diferentes países puedan ser comparadas fácilmente. [37]

Para poder determinar la incertidumbre de medida es preciso identificar las posibles fuentes que aportan a esa incertidumbre, clasificarlas y luego evaluarlas. El propósito de la clasificación en Tipo A y Tipo B es indicar las dos formas diferentes de evaluar las componentes de incertidumbre, a efectos únicamente de su análisis; la clasificación no trata de indicar que exista alguna diferencia de naturaleza entre las componentes resultantes de ambos tipos de evaluación. Los dos tipos de evaluación se basan en distribuciones de probabilidad, y las componentes resultantes tanto de uno como del otro tipo de evaluación se cuantifican mediante varianzas o desviaciones estándares. [37] [51]

1.9. Conclusiones parciales

Presentado y analizado el marco teórico se arriba a las siguientes conclusiones:

1. La metrología industrial garantiza la calidad de las mediciones en los procesos productivos y de servicios.
2. En Cuba existe un grado de organización de la metrología caracterizada por la escasez de recursos, con pocas oportunidades de poder adquirir los patrones de alta exactitud, debido a los efectos del bloqueo.
3. La metrología está íntimamente relacionada con la teoría estadística, de ahí la importancia de dominar con claridad los términos y conceptos asociados con la metrología y las definiciones estadísticas que resultan básicas para el procesamiento de los datos generados en el proceso de calibración.

4. La calidad de las mediciones en un laboratorio de calibración viene dada por los niveles de incertidumbres con que estas se realizan y con los procedimientos que se aplican. La relación TUR proporciona un buen criterio a la hora de seleccionar el instrumento adecuado para una medida y de este modo garantizar la CMR adecuada.
5. No siempre se cumplen las condiciones para la aplicación del Teorema del límite central, por lo que no siempre la incertidumbre expandida estará representada por una distribución normal; y no siempre $k=2$.
6. El personal tiene la marcada repercusión en los niveles de incertidumbres que puedan alcanzarse en los procesos de medición donde ellos intervengan y aporten en alguna de las fuentes de incertidumbres.

CAPÍTULO 2. Propuesta de proceder para realizar la determinación de la Incertidumbre.

En este capítulo se aborda la propuesta para llevar cabo el proceder general para realizar el cálculo de la incertidumbre de la medición durante el proceso de calibración de instrumentos o sistemas de medida, explicando detalladamente cada uno de los pasos a seguir, haciendo especial énfasis en la evaluación de las fuentes de incertidumbre y los casos prácticos que se pueden presentar.

2.1 Introducción

Cuando se fabrica una pieza, antes de ponerla en servicio o venderla se procede a la medición de cotas para comprobar que las dimensiones están dentro de las tolerancias permitidas en el diseño, [52], de igual forma en un proceso tecnológico donde los parámetros químicos deben estar entre unos límites determinados se procede a su monitoreo con una frecuencia determinada. Esta comprobación se realiza mediante un «sistema o instrumento de medida». El sistema o instrumento de medida debe estar calibrado de forma adecuada para que la medida sea correcta. Todos los sistemas e instrumentos de medida deben ser trazables a los patrones nacionales.

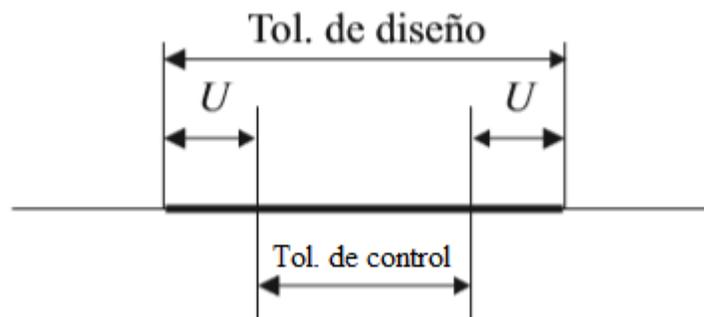


Figura 2.1. Ilustración de las tolerancias de diseño y de control.

En el control de una especificación con su tolerancia, se ha de utilizar un instrumento capaz de comprobarla. Como no hay instrumento absolutamente exacto, se establece un intervalo de control para determinar si se cumple la

especiación. El ancho de ese intervalo suele ser la tolerancia de diseño menos dos veces la incertidumbre de la medición, según la figura 2.1. Se recomienda que la relación entre la tolerancia de diseño y la incertidumbre del instrumento de medida con el que se compruebe guarde la relación expresada en (1.2).

Razones técnicas y económicas se oponen a la hora de establecer los niveles de exactitud requeridos. Por un lado se corre un alto riesgo de rechazar piezas válidas y por el otro el costo del instrumento de medida crece exponencialmente con la exactitud del mismo. Este criterio también sirve al diseñador que debe establecer cotas e índices de calidad que sean realmente comprobables. [52].

La calidad de un instrumento no necesariamente garantiza una buena calidad en una medida. Las medidas no son simples números exactos, sino que consisten en intervalos, dentro de los cuales se confía esté el valor esperado.

El método ideal para evaluar y expresar la calidad con que se realizan las mediciones es mediante la relación entre las incertidumbres, por lo que el método para su evaluación debe ser universal, es decir, aplicable a todo tipo de medición.

2.2 Procedimiento general para el cálculo de la incertidumbre

Partiendo de lo descrito en el documento JCM100:2008, Apartado 3, y S. Sáez: 2001, Curso Incertidumbre de las mediciones impartido en la Oficina Territorial de Normalización de Villa Clara: 1999, los cuales tienen como base a la "Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida", se tiene que el proceso de evaluación de la incertidumbre estándar presupone realizar los pasos descritos en la figura 2.2. [37] [40] [53] [42]

2.2.1 Definición del mensurando

El propósito de una medición es determinar el valor de una magnitud, llamada "el mensurando". La definición del mensurando es vital para obtener buenos resultados de la medición.

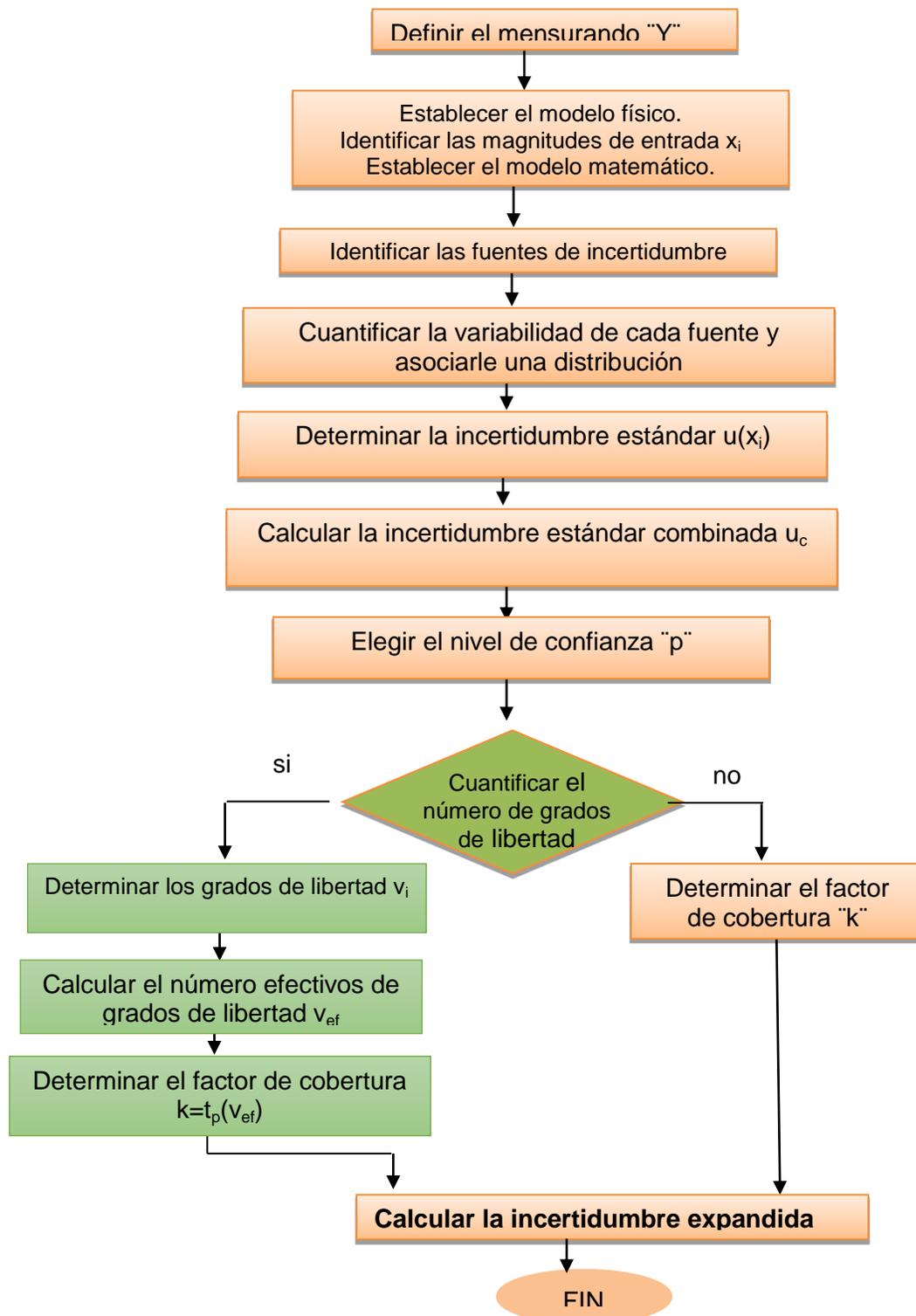


Figura 2.2 Procedimiento general para la determinación de la incertidumbre.

El principio, el método y el procedimiento de medición son determinantes en el valor de la incertidumbre de la medición. Un conocimiento insuficiente de ellos muy probablemente conducirá a una estimación equivocada, o incompleta en el mejor de los casos, de la incertidumbre de la medición.

2.2.2 Establecer el modelo matemático

Consiste en expresar matemáticamente la relación existente entre el mensurando (Y) y las magnitudes de entrada de las que depende (X_i).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.1)$$

2.2.3 Identificación y análisis de las fuentes de incertidumbres

En la práctica existen numerosas fuentes posibles de incertidumbre en una medición, entre ellas: definición incompleta del mensurando; realización imperfecta de la definición del mensurando; muestra no representativa del mensurando; conocimiento incompleto de los efectos de las condiciones ambientales sobre la medición, o medición imperfecta de dichas condiciones ambientales; lectura sesgada de instrumentos analógicos por parte del técnico; resolución finita del instrumento de medida o umbral de discriminación; valores inexactos de los patrones de medida o de los materiales de referencia; valores inexactos de constantes y otros parámetros tomados de fuentes externas y utilizadas en el algoritmo de tratamiento de los datos; aproximaciones e hipótesis establecidas en el método y en el procedimiento de medida y variaciones en las observaciones repetidas del mensurando, en condiciones aparentemente idénticas.

Estas fuentes no son necesariamente independientes, y algunas de ellas, desde la primera hasta la penúltima, pueden contribuir a la última citada anteriormente. No se deben tener en cuenta dos veces las componentes de incertidumbres. Si una componente de incertidumbre se obtiene a partir de una evaluación tipo B, únicamente debe incluirse como una componente independiente de incertidumbre si su efecto no contribuye a la variabilidad apreciada en las observaciones, ya que dicha componente pueda haber sido evaluada a partir del análisis estadístico de

las observaciones.

No se recomienda desechar en la identificación alguna de las fuentes de incertidumbres por la suposición de que es poco significativa sin una cuantificación previa de su contribución completa en relación con las demás. Un efecto sistemático no identificado puede no ser tenido en cuenta en la evaluación de la incertidumbre del resultado de una medición, aunque contribuirá a su error.

Partiendo del análisis del modelo matemático, se confecciona el listado de todas las posibles fuentes de incertidumbres, que influyen en el resultado de la medición. Se procede a analizar cada una de ellas clasificándolas según el método, para su posterior cuantificación, en método de evaluación tipo A y método de evaluación tipo B; y se le asignan las distribuciones según su comportamiento (normal, rectangular o triangular). En el proceder actual seguido por el laboratorio de la UEB ATI Villa Clara, se asume que la incertidumbre combinada sigue una distribución con un comportamiento normal, y por lo tanto $k=2$, consideración no totalmente acertada, porque no siempre todas las fuentes tienen aproximadamente el mismo nivel de aporte, en ocasiones predominan una o dos tipo "B", por lo que la contribución resultante puede asumir distribución rectangular, trapezoidal o triangular, lo cual justifica la hipótesis planteada.

Actualmente existen dos métodos fundamentales de evaluación de las fuentes de incertidumbres, los cuales serán tratados a continuación:

Método de evaluación tipo A: Se estima una distribución basándose en mediciones repetidas obtenidas del mismo proceso de medición. La incertidumbre estándar se puede obtener mediante la desviación estándar experimental. Si se realizan menos de 10 mediciones es necesario afectar el resultado por la desviación "t de Student". Se usa la distribución "t de Student" porque no se conoce a ciencia cierta la desviación estándar de la distribución normal. La distribución t de Student, se aproxima a la normal cuando el número de grados de libertad tiende a infinito. [54]

$$u_c = t * S(\bar{X}) \quad (2.2)$$

Siendo: t (factor t de la tabla, basado en la distribución “t” de Student) .

Tabla 2.1- Factor “t” basado en la distribución “t” de Student

n	2	3	4	5	6	7	8
t	6,5	2,2	1,6	1,4	1,3	1,3	1,2

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (2.3)$$

$$S(\bar{X}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}} \quad (2.4)$$

donde:

n: Número de mediciones

$S(\bar{X})$: Desviación estándar experimental de la media.

Para una medición que se realiza por un método bien caracterizado y bajo condiciones controladas, es razonable suponer que la distribución (dispersión) de las x_i no cambia, o sea se mantiene prácticamente igual para mediciones realizadas en diferentes días, por distintos metrólogos, etc. (esto es, la medición está bajo control estadístico). En este caso esta componente de la incertidumbre puede ser más confiablemente estimada con la desviación estándar s_p obtenida de un solo experimento anterior, que con la desviación estándar experimental $s(x)$ obtenida por un número “n” de mediciones, casi siempre pequeño, según la ecuación (2.3). La incertidumbre estándar de la media se estima en este caso por: [55]

$$u(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (2.5)$$

No se puede dar una recomendación general para el número ideal de las repeticiones “n”, ya que éste depende de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición específica. Hay que considerar que: aumentar

el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre por repetibilidad, la cual es proporcional a $1/\sqrt{n}$; un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo; en pocos casos se recomienda o se requiere "n" mayor de 10. Por ejemplo cuando se caracterizan instrumentos o patrones, o se hacen mediciones o calibraciones de alta exactitud; y para determinar el impacto que tiene "n" en la incertidumbre expandida puede estimarse su influencia en el número de grados efectivos de libertad, de ser aplicable este concepto.

Método de evaluación tipo B: La evaluación se realiza utilizando información externa u obtenida por experiencia. Los datos para calcular la incertidumbre pueden ser tomados de:

1. **Certificados de calibración:** Se emplea sólo cuando se realizan correcciones en las mediciones. Para determinar la contribución de esta fuente de incertidumbre se parte de los datos reportados en un certificado de calibración, hay que tener en cuenta qué tipo de incertidumbre es la que aparece en el certificado (estándar combinada $u_c(x)$ o expandida $U(x)$). Si es la expandida es necesario dividirla por el factor de cobertura "k" que aparece reportado en dicho el certificado.

$$u_c = \frac{U(x)}{K} \quad (2.6)$$

La deriva del instrumento (D). Se obtiene de la historia de las calibraciones sucesivas realizadas al instrumento de medida. Se considera una desviación rectangular y se determina la contribución a la incertidumbre estándar combinada como la desviación estándar, según la ecuación (A.11), quedando:

$$u_D = \sigma(D) = \frac{D_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

Para dos calibraciones sucesivas, la deriva máxima del patrón, se determina

como la diferencia máxima entre la corrección en la calibración n (C_n) menos la corrección en la calibración n-1 (C_{n-1}), en valor absoluto para cada punto calibrado, según la ecuación

$$\Delta D_{max} = |C_n - C_{n-1}|_{max} \quad (2.8)$$

Si los datos de las calibraciones fuesen de varios laboratorios o las incertidumbres fuesen dispares entre dichas calibraciones, para estimar un límite máximo de la deriva, podría ser conveniente considerar dichas incertidumbres.

$$\Delta D_{max} = |C_n - C_{n-1}|_{max} + U_n + U_{n-1} \quad (2.9)$$

2. Datos técnicos de fabricantes:

I. Se utiliza el aporte del error máximo permisible (EMP), cuando no se realizan correcciones en las mediciones. Se considera una distribución rectangular y se determina la contribución a la incertidumbre estándar combinada como la desviación estándar, según la ecuación (A.11), quedando:

$$u_{emp} = \sigma(emp) = \frac{EMP}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

II. La resolución del instrumento (R). Está presente siempre que se utilice un instrumento de indicación digital para realizar el proceso de medida, dado por su discriminación finita. Se considera una distribución rectangular y se determina la contribución a la incertidumbre estándar combinada como la desviación estándar, según la ecuación (A.11), quedando:

$$u_R = \sigma(R) = \frac{R/2}{\sqrt{3}} = \frac{R}{\sqrt{12}} \quad (2.11)$$

III. La apreciación de las lecturas (A). Está presente siempre que se utilice un instrumento de indicación analógica para realizar el proceso de medida, dada por la apreciación visual del observador. Se considera una distribución rectangular y se determina la contribución a la incertidumbre estándar combinada como la desviación estándar, la ecuación (A.11), quedando:

$$u_A = \sigma(A) = \frac{A/2}{\sqrt{3}} = \frac{n*Vd/2}{\sqrt{3}} = \frac{n*Vd}{\sqrt{12}} \quad (2.12)$$

Donde:

n: es el número de subdivisiones que visualmente se pueden realizar entre dos divisiones sucesivas marcadas de la escala (n=1/2, 1/3, 1/4....)

Vd: es el valor de una división en la escala.

IV. El efecto de algunas magnitudes influyentes (Δ). Es información que aporta el fabricante. Se considera que es una distribución rectangular y se determina la contribución a la incertidumbre estándar combinada como la desviación estándar, según la ecuación (A.11), quedando:

$$u_{\Delta} = \sigma(\Delta) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (2.13)$$

3. Método de medida.

- I. Error del método, por ejemplo, en la medida de la resistencia con un amperímetro y un voltímetro es introduce un error debido a la resistencia interna de los amperímetros distinta de cero o debido a la impedancia interna de los voltímetros distinta de infinito cuando se utiliza una conexión larga. Se considera que es una distribución rectangular y se determina de la forma descrita en la ecuación (2.13).
 - II. Estabilidad y repetibilidad del instrumento. Es un dato que a veces facilita el fabricante. Se considera que es una distribución rectangular y se determina de la forma descrita en la ecuación (2.13). Si el fabricante indicó el valor en una desviación estándar se toma directamente el valor. Si se realizaron repetidas mediciones no se toma en cuenta el dato de repetibilidad dado por el fabricante porque estaría contenido en el aporte de la evaluación tipo A.
4. Criterio de medida. Es la contribución que se introduce en función de criterio de medida que se utiliza, por ejemplo, cuando existe inestabilidad de la medida que se manifiesta en una variación de la lectura del instrumento. Se considera que es una distribución rectangular y se determina la contribución a

la incertidumbre estándar combinada determinando los valores máximos y mínimos del intervalo de variación y considerando como valor medido el punto medio, se utilizan las ecuaciones (2.14) y (2.15).

$$u_{\Delta} = \sigma(\Delta) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{(\text{valor máximo}-\text{valor medio})}{\sqrt{3}} = \frac{(\text{valor medio}-\text{valor mínimo})}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

o

$$u_{\Delta} = \sigma(\Delta) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{(\text{valor máximo}-\text{valor mínimo})/2}{\sqrt{3}} = \frac{(\text{valor máximo}-\text{valor mínimo})}{\sqrt{12}} \quad (2.15)$$

Si se tomara como valor medido el valor mínimo o el máximo, la contribución estaría determinada por la siguiente expresión:

$$u_{\Delta} = \sigma(\Delta) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{(\text{valor máximo}-\text{valor mínimo})}{\sqrt{3}} \quad (2.16)$$

Esta contribución no se incluirá cuando se haya considerado como contribución a la incertidumbre la repetibilidad del instrumento de medida. Sustituirá a la estabilidad a corto plazo que pudiese ser dada por el fabricante.

5. Histéresis. Puede estar presente en los instrumentos de medida (I/M) debido a la diferencia entre las lecturas de ascenso y descenso. Se considera una distribución rectangular y se determina la contribución a la incertidumbre estándar combinada como se describe en la ecuación (2.11), sustituyendo "R" por "H".
6. Redondeo. Siempre que se realiza un redondeo se introduce una contribución a la incertidumbre estándar combinada igual al máximo valor del redondeo que se puede hacer, en función del criterio que se haya definido, Se considera que es una distribución rectangular y se determina la contribución a la incertidumbre estándar combinada de la forma descrita en la ecuación (2.13).

2.2.4 Determinación de la incertidumbre estándar combinada

Se utiliza la Ley de propagación de incertidumbres. Si no existe correlación entre las variables se determina como:

$$u^2(y) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2 \quad (2.17)$$

$$uc(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(x_i)^2} \quad \text{Siempre que:} \quad \frac{\partial f}{\partial x} = 1 \quad (2.18)$$

También puede determinarse como incertidumbre relativa de la forma:

$$\left[\frac{uc(y)}{y} \right]^2 = \sum_{i=1}^n \left[p_i \frac{u(x_i)}{x_i} \right]^2 \quad (2.19)$$

Si existe correlación entre las variables se determina como:

$$u^2(y) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2 + 2 * \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) \quad (2.20)$$

Para estimar si existe correlación entre las variables se tiene en cuenta que las variables son independientes cuando la probabilidad asociada a una de ellas no depende de la otra y puede estimarse estadísticamente a partir del coeficiente de correlación lineal.

$$r(x, z) = \frac{u(x, z)}{u(x) * u(z)} \quad (2.21)$$

Donde $u(x, z)$ es la covarianza de las variables objeto de estudio y se determina como:

$$u(x, z) = \frac{1}{n * (n-1)} * \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}) * (z_k - \bar{z}) \quad (2.22)$$

Un valor de $r=0$ indica independencia entre "x" y "z". Los valores de $r=1$ o $r=-1$ indican una correlación lineal total.

2.2.5 Cálculo de la incertidumbre expandida

Se determina como:

$$U(y) = k * u_c(y) \quad (2.23)$$

En la práctica, dado que los parámetros que caracterizan las distribuciones de probabilidad de las magnitudes de entrada son habitualmente estimaciones, que no es realista esperar que el nivel de confianza correspondiente a un intervalo dado pueda conocerse con un elevado grado de exactitud y que la convolución de

distribuciones de probabilidad es compleja de realizar, tales convoluciones raramente se realizan a la hora de calcular el intervalo correspondiente a un nivel de confianza específico. En su lugar, se utilizan aproximaciones basadas en el Teorema del Límite Central. [56], [57]

Siempre que pueda demostrarse que se cumplen aproximadamente las hipótesis para la validez del Teorema del Límite Central, en particular que la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ no esté dominada por una componente de incertidumbre estándar obtenida por una evaluación Tipo A basada en unas pocas observaciones, o por una componente de incertidumbre estándar obtenida por evaluación Tipo B de distribución rectangular, una primera aproximación razonable para el cálculo de la incertidumbre expandida utilizando la expresión (2.23), que proporciona un intervalo con nivel de confianza “ p ”, es utilizar para $k(p)$ un valor tomado de la distribución normal.

Resulta importante destacar que uno de los inconvenientes que posee el proceder actual para la calibración de los instrumentos y sistemas de medida, es que no elige el factor de cobertura k , es decir, se asume que $k=2$, sin analizar si se cumple o no el teorema del límite central, lo cual incide en la calidad con que se expresan los resultados. Este aspecto fue debidamente considerado al enunciar el problema científico relativo a la selección del factor de cobertura “ k ”.

2.2.5.1. Elección del factor de cobertura (k)

Es típico en los laboratorios de calibración un factor de cobertura igual a dos, que corresponde a un nivel de confianza de un 95 %, esto es aplicable con fiabilidad si al combinar varias fuentes de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada, mediante la aplicación del Teorema del Límite Central, se puede aproximar la distribución resultante a una distribución normal. La aproximación será mejor mientras mayor sea el número de fuentes y sus contribuciones sean similares con independencia de la forma de sus distribuciones.

La relación entre el factor de cobertura “ k ” y el nivel de confianza “ p ” depende de

la distribución de probabilidad del mensurando. Por ejemplo, en una distribución rectangular $p=57,74\%$ si $k=1$, y para lograr un nivel de confianza de $95,45\%$ se requiere multiplicar por $k=1,65$. [55]

Deben tenerse en cuenta algunos factores para no cometer errores con la elección de “k”; por ejemplo:

- El nivel de confianza requerido.
- Conocimiento de las distribuciones.
- Conocimiento del número de valores utilizados para estimar efectos aleatorios.

El valor de “k” cuando no se cumple el Teorema del Límite Central, porque los aportes de las fuentes que contribuyen no sean similares, es necesario determinar el valor de “k” para lo cual se debe analizar si:

- I. En la incertidumbre combinada predomina una evaluación tipo A basada en observaciones estadísticas con relativamente pocos grados de libertad (menos de seis), entonces, la elección de “k” depende del número de grados de libertad efectivos (v_{ef}) de la incertidumbre estándar $u(y)$ asociada a la estimación de salida.

Frecuentemente los valores del mensurando siguen una distribución normal, pero el mejor estimado del mesurando (la media) dividida entre su desviación estándar, sigue una distribución llamada “t de Student”, la cual refleja las limitaciones de información debido al número finito de observaciones. La “t de Student” es caracterizada por el parámetro llamado número de grados de libertad.

El número efectivo de grados de libertad (v_{ef}), considera el número de grados de libertad (v_i), de cada fuente. La ecuación de Welch-Satterthwaite es utilizada para calcular el número efectivo de grados de libertad.

$$V_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.24)$$

Donde v_i son los grados de libertad que se determinan como:

$$v_i = n - 1 \quad (2.25)$$

Siendo n : el número de observaciones realizadas en el proceso de medición.

La obtención de v_{ef} a partir de la ecuación (2.24) implica conocer el número de grados de libertad v_i de cada incertidumbre estándar. Para una componente obtenida mediante evaluación Tipo A, v_i depende del número de observaciones repetidas e independientes sobre las que se basa la estimación de la entrada correspondiente, así como del número de magnitudes independientes determinadas a partir de dichas observaciones. Para una componente obtenida mediante evaluación Tipo B, v_i depende de la fiabilidad que pueda suponerse al valor de dicha componente.

Con los grados de libertad efectivos se va a la tabla 2.2 y se selecciona el valor de “k”. Los grados de libertad efectivos son siempre números enteros por lo que el resultado de la aplicación de la fórmula de Welch-Satterthwaite, debe ser aproximado por defecto.

Tabla 2.2- Factores de cobertura “k” para diferentes grados efectivos de libertad (v_{ef}) para una confianza de un 95,45 %.

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

Si el cálculo de incertidumbre involucra solo una evaluación tipo A con un número de lecturas mayor que 2, y la incertidumbre estándar combinada es mayor que dos veces la tipo A, entonces $k=2$ proveerá una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 % y no es necesario utilizar la fórmula de Welch-Satterthwaite. [40]

- II. En la incertidumbre combinada predomina la contribución de una fuente con función de distribución no normal, lo más conveniente es estimar la

incertidumbre expandida directamente de los parámetros de la distribución. Por ejemplo, cuando las lecturas obtenidas con un instrumento de baja exactitud son idénticas debido a la resolución del instrumento y las otras fuentes de incertidumbres son insignificantes, es plausible suponer que el mensurando sigue una distribución rectangular cuyos límites están determinados por el valor de la escala del instrumento. Entonces puede estimarse directamente el ancho del intervalo que contiene la fracción “p” de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando [55].

Una simple prueba puede ser usada para probar que predomina una componente de incertidumbre evaluada como tipo B, con función de distribución rectangular. Si $u_1(y)$ es la componente de incertidumbre tipo B y $u_R(y)$ es la incertidumbre combinada de las contribuciones del resto de las fuentes de incertidumbres, y se cumple que $\frac{u_1(y)}{u_R(y)} > 1,4$ entonces predomina la tipo B, con función de distribución rectangular.

En este caso es posible aplicar la siguiente aproximación:

a. Si se cumple que:

$$\frac{u_R(y)}{u_1(y)} \leq 0,3 \quad (2.26)$$

Entonces $k=1,65$. [58]

b. Si no, es necesario probar la relación que existe entre la incertidumbre que aporta la distribución normal y la rectangular, tomando k_i el valor que aparece en la tabla 2.3. [59]

Tabla 2.3- Factores de cobertura “k” para diferentes relaciones entre la incertidumbre que aporta la distribución normal y la rectangular para una confianza de un 95,45 %.

$\frac{u_i(y)normal}{u_i(y)rectangular}$	k_i	$\frac{u_i(y)normal}{u_i(y)rectangular}$	k_i	$\frac{u_i(y)normal}{u_i(y)rectangular}$	k_i
0,00	1,65	0,50	1,84	0,95	1,95
0,10	1,66	0,55	1,85	1,00	1,95

$\frac{u_i(y)normal}{u_i(y)rectangular}$	k_i	$\frac{u_i(y)normal}{u_i(y)rectangular}$	k_i	$\frac{u_i(y)normal}{u_i(y)rectangular}$	k_i
0,15	1,68	0,60	1,87	1,10	1,96
0,20	1,70	0,65	1,89	1,20	1,97
0,25	1,72	0,70	1,90	1,40	1,98
0,30	1,75	0,75	1,91	1,80	1,99
0,35	1,77	0,80	1,92	2,00	1,99
0,40	1,79	0,85	1,93	2,50	2,00
0,45	1,82	0,90	1,94	∞	2,00

III. cuando en la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ predominan dos componentes de incertidumbre con evaluaciones tipo B, con función de distribución rectangular de valores con semi-intervalos a_1 y a_2 , la distribución resultante de su convolución es una distribución trapezoidal simétrica (figura 2.3), con semi-intervalos $a = (a_1+a_2)$ y $b = (a_1-a_2)$. [58]

$$\beta = \frac{b}{a} = \frac{|a_1-a_2|}{a_1+a_2} \quad (2.27)$$

$$\text{Si } \beta \leq \frac{p}{2-p} \text{ entonces } k(p) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}} * (1 - \sqrt{(1-p)(1-\beta^2)}) \quad (2.28)$$

$$\text{Y si } \beta > \frac{p}{2-p} \text{ entonces } k(p) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{2}}} * \left(\frac{p(1+\beta)}{2}\right) \quad (2.29)$$

Donde p es el nivel de confianza.

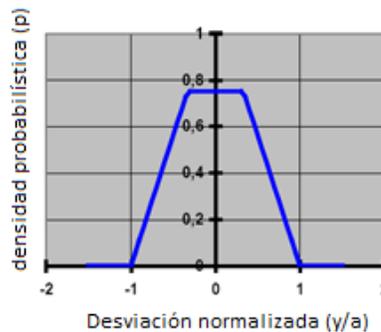


Figura 2.3 Distribución de probabilidad trapezoidal.

Un caso particular de la distribución trapezoidal es cuando los semi-intervalos a y b son iguales, en cuyo caso la distribución resultante de la convolución es Triangular, (figura A.17). [59]

Con la propuesta del nuevo cálculo del valor del factor de cobertura (k) descrito anteriormente, se mejora la calidad de la expresión del resultado de la medición durante el proceso de calibración, lo cual constituye uno de los aportes de este trabajo de investigación. En este contexto, resulta necesario, evaluar bajo estas condiciones el cálculo de la incertidumbre expandida.

2.2.6 Expresión de la incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida de la medición reportada es el resultado de multiplicar la incertidumbre estándar del resultado de la medición por el factor de cobertura “ k ”, tal que la probabilidad de cobertura corresponda aproximadamente a un 95 %. [60]

La incertidumbre expandida será expresada con dos cifras significativas y el valor del estimado del mensurando debe redondearse de forma que no contenga cifras posteriores a la posición decimal de la última significativa reportada en la incertidumbre asignada al mismo. Debe expresarse en las mismas unidades que el mesurando.

Para el proceso de redondeo, deben aplicarse las normas habituales para el redondeo de cifras (para más detalles, véase el documento ISO 80001:2009, Anexo B). Sin embargo, si el redondeo reduce el valor numérico de la incertidumbre de medición en más de un cinco por ciento, debe utilizarse el valor redondeado hacia arriba. [58], [61]

La incertidumbre reportada en el certificado de calibración debe ser menor o igual que la capacidad máxima de calibración (CMC), reportada por el Laboratorio de Calibración al Órgano Nacional de Acreditación, en el caso de Cuba, al ONARC. [62].

Hasta aquí queda debidamente explicada la propuesta de mejora de la calidad del proceder de determinación de la incertidumbre de la medición, gracias a la inclusión de un nuevo y más realista valor del factor de cobertura, aspecto que hasta el momento no se incluía en el proceder actual.

2.3 Conclusiones parciales.

- La propuesta de modificaciones al proceder para la determinación de la incertidumbre de la medición garantiza evaluar un valor más real del factor de cobertura que incide positivamente en el resultado de la medición.
- El principio, el método y el nuevo procedimiento de evaluación de la incertidumbre propuesto son determinantes en el valor de la incertidumbre de la medición.
- Para la aplicación de la propuesta de proceder hay que tener presente que cuando se realizan correcciones en la medición se debe tener en cuenta la contribución a la incertidumbre estándar combinada que aporta la incertidumbre reportada en el certificado de calibración, no considerándose la que aporta el EMP del instrumento patrón utilizado para realizar las mediciones y viceversa.
- Cuando se realizan observaciones repetidas es necesario comparar el efecto que tendría el aporte de esta fuente sobre el resultado final y el aporte de la fuente por resolución, sólo se toma en cuenta la de mayor valor.
- En el nuevo proceder establecido el valor de “k”, para la expresión de la incertidumbre expandida, cuando no se cumple el Teorema del Límite Central puede ser diferente de 2, y es necesario conocer cuál es la distribución de la(s) fuente(s) que predomina(n), para poder aplicar las diferentes técnicas estadísticas para la determinación de su valor y asociarle una distribución.
- En la propuesta de proceder es fiable elegir el factor de cobertura “k” igual a 2, si al combinar varias fuentes de incertidumbres para obtener la

incertidumbre combinada se puede aplicar el Teorema del Límite Central, ello se corresponde a un nivel de confianza de un 95 % y la distribución resultante se puede aproximar a una distribución normal.

- La relación entre el factor de cobertura “k” y el nivel de confianza “p” depende de la distribución de probabilidad del mensurando.

CAPÍTULO 3 Propuesta de proceder para la calibración metrológica de los sistemas de medidas.

En este capítulo se realiza la propuesta de proceder para realizar la calibración metrológica siguiendo una secuencia lógica, comenzando por las generalidades que se deben tener en cuenta para realizar este nuevo proceso, la determinación de las características del sistema, cómo realizar las corridas, la toma de datos y el procesamiento matemático que es necesario para obtener el resultado final del proceso de calibración (el error teniendo en cuenta la incertidumbre del proceso de medida).

3.1. Introducción

Los sistemas de medida pueden ser utilizados con diferentes funciones, puede ser sólo con el interés de monitorear una determinada variable, o para con el resultado de la medición controlar un proceso determinado.

El objetivo de un sistema de medida es medir una magnitud de salida (variable de proceso) de la forma más exacta posible, para mantener la variable de control dentro de los límites establecidos.

Hasta los mejores sistemas e instrumentos de medida carecen de estabilidad absoluta, se desvían y pierden su capacidad de dar mediciones exactas. Es esta desviación la que hace necesaria la calibración. Las desviaciones son motivadas principalmente por las condiciones ambientales a las que son expuestos, el uso correcto dentro de las especificaciones dadas por el fabricante y la severidad en el uso, [63]. Incluso los instrumentos de un mismo fabricante, marca y modelo pueden tener rendimientos diferentes.

No existe ningún instrumento ideal y por tanto ningún sistema de medida, que sea capaz de medir con absoluta exactitud. Una característica metrológica de cualquier instrumento o sistema de medida es la caracterización de la aproximación con que mide. Desafortunadamente en una gran mayoría de procesos industriales el proceso de medición se ve como una “caja negra”, en donde se focalizan a establecer como

el punto más importante al instrumento de medida, sin conocer que está sucediendo en dicha “caja negra [17], y quedando sin cobertura metrológica el resto de los elementos que componen el sistema y que contribuyen a la exactitud con que se efectúa la medición.

Partiendo de lo expuesto anteriormente es muy necesaria la calibración metrológica, por lo que como resultado de esta investigación se propone un proceder para realizar la calibración metrológica de un sistema o una cadena de medida.

3.2. Procedimiento para la calibración de sistemas y cadenas de medida.

3.2.1 Generalidades para el proceso de calibración.

Para realizar este proceso es necesario que se cumplan las siguientes condiciones: las calibraciones deberán ser realizadas por personal técnico capacitado y autorizado para ello; en el local donde se realizará el proceso de calibración se mantendrán la temperatura y humedad de trabajo de acuerdo a las condiciones de funcionamiento del equipamiento patrón seleccionado; deberá estar disponible toda la documentación y asesoría necesaria para la identificación de las señales a medir. Las cadenas ó sistemas de medida deben haber sido previamente comprobados y ajustados; en todo momento el técnico calibrador debe ser acompañado por el personal designado de la entidad donde se realiza la calibración; en los locales donde se encuentren los instrumentos de medida (patrón e indicador del sistema de medida) no deben existir vibraciones apreciables que puedan afectar la medición y las mediciones deberán ser realizadas siempre en parada de los procesos.

Calibrar un instrumento de medida supone comparar sus mediciones con un patrón o una medida materializada, para lo cual se debe seleccionar la capacidad de medición requerida. Se necesitan calibradores multifuncionales para la medición y generación de señales de intensidad de corriente, tensión, temperatura, presión, etc., que cumplan la relación expresada para la idoneidad del método, para cada una de las magnitudes e intervalos a medir. Como mínimo debe cumplirse que la relación entre la incertidumbre del sistema de medida que se calibra y la incertidumbre expandida

sea al menos cuatro veces, para garantizar un 95 % de confianza.

Si no se conoce la incertidumbre del sistema de medida, se puede determinar una vez conocido el error que este permite. Si no se conoce este error, pero se conocen los errores de todos los elementos del sistema o la cadena, se puede determinar al menos el error de la capacidad de medición instalada.

$$\text{emp}_{\text{sist}} = \sqrt{\text{emp}_1^2 + \text{emp}_2^2 + \text{emp}_3^2 \dots + \text{emp}_n^2} \quad (3.1)$$

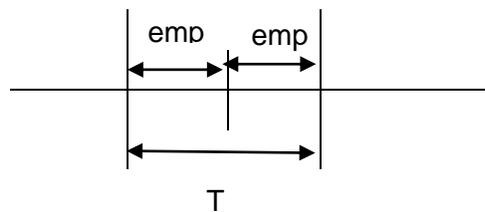


Figura. 3.1 Representación del error respecto al punto de medición y la tolerancia

A partir de aquí se determina el rango de Incertidumbre en el que debe operar ese proceso de medición a partir de la expresión (1.2), quedando:

$$\frac{T}{20} \leq U \leq \frac{T}{6} \quad (3.2)$$

Cuando se calibran sistemas de medida de la variable temperatura se necesitan baños portátiles de temperatura con intervalo de indicación de acuerdo al intervalo a medir, juego de termómetros patrones adecuados para el intervalo a medir y errores máximos permisibles que cumplan la relación tolerancia incertidumbre expresada con anterioridad, termómetros de resistencia ó termopares con indicador digital de resolución 0,1°C ó mejor; y cuando se calibran sistemas de medida de la variable presión se necesitan bombas manuales de presión.

La calibración se realizará por conjunto de todos los elementos que componen la cadena ó el sistema de medida. Deben participar dos técnicos: uno ubicado en el campo, que será el encargado de simular las señales a la entrada del sistema de medida, y otro ubicado donde se encuentre el elemento que visualiza la medida,

puede ser un instrumento de medida analógico o digital o simplemente una computadora; este técnico anotará las indicaciones leídas. Existirá comunicación entre ellos, utilizando los medios apropiados (por ejemplo, dos transmisores - receptores portátiles), para sincronizar el inicio de las mediciones.

En casos prácticos en la industria se puede realizar primero la caracterización del sensor del sistema de medida en un laboratorio y luego con los resultados de la salida del sensor realizar posteriormente la calibración de la cadena de medida, utilizándolos como entrada al proceso de calibración.

El método a emplear es el de comparación directa con las indicaciones del patrón, en correspondencia con lo establecido en la norma IEC 61298-2:2008 Process measurement and control devices [15].

3.2.2 Determinación de las características del sistema

Abordadas las generalidades para la realización exitosa del proceso de calibración se da paso a la secuencia lógica a seguir para realizar este proceso, que basado en las buenas prácticas, incluyen:

- Comprobación del examen exterior.
- Comprobación de ajustes
- Determinación de los errores de indicación.
- Determinación de la incertidumbre de la medición
- Expresión final de los resultados

El proceso de calibración comienza con la realización del examen exterior del sistema de medida, comprobando que todos los elementos estén debidamente conectados y puedan ser identificados (que posean número de serie), en caso contrario se procede a la marcación. Se revisa que los bornes de cada elemento que se interconecta se encuentren en buen estado, que la indicación de salida pueda ser observada con claridad y que los medios de transmisión de las señales estén en buen estado.

Continúa el proceso de calibración con la comprobación de los ajustes, para lo cual se realizará una comprobación de los valores extremos de la variable (0 % y 100 % de la escala) para determinar el ajuste correcto del cero y el rango. De no cumplirse este aspecto, se detiene el proceso de calibración y se pasa al proceso de ajuste, si se tiene previsto.

Para la determinación de los errores de indicación se incluirá el sensor siempre que las condiciones y su ubicación lo permitan; para ello se aplicará la señal proveniente del instrumento de medida patrón (calibrador) directamente al sensor, estando en presencia de un sistema de medida con todos sus elementos. Cuando no es posible incluir el sensor, se abre el circuito y se aplica la señal de entrada al elemento siguiente, estando en presencia de una cadena de medida.

Para la determinación de los errores de indicación es necesaria la toma de datos y su procesamiento, aspecto que se trata a continuación.

3.2.3 Corridas y toma de datos

La calibración se lleva a cabo mediante el aumento y disminución de las mediciones, o sea, en ascenso (Asc) y descenso (Desc). Amparados por lo establecido en la norma IEC 61298-2:2008, se pueden realizar pruebas completas o pruebas simplificadas, las cuales se diferenciarían por los ciclos de mediciones y el número de puntos, tal como se muestra en la tabla 3.1.

Aspectos importantes relacionados con la toma de datos, entre los que se incluyen los ciclos de medición y la cantidad de puntos a medir no son tenidos en cuenta en la actual instrucción de calibración de los sistemas y cadenas de medida, ello fue debidamente explicado en la descripción del problema científico; por consiguiente se incorpora como otro aporte de este trabajo de investigación aplicar lo contemplado en la referida norma IEC 61298-2:2008 al nuevo proceder.

El número de puntos a chequear, así como los ciclos a realizar se seleccionan estableciendo un compromiso entre la objetividad, relevancia, costo y dificultades técnicas de las mediciones a realizar, entre otros factores, de acuerdo siempre con

las necesidades del cliente. Teniendo en cuenta todo esto, se propone realizar una de las pruebas completas cuando se realiza el ajuste previo a la calibración de un sistema de nuevo montaje y la simplificada cuando se realiza el proceso de calibración de cualquier sistema o cadena de medida de forma rutinaria.

Tabla 3.1- Puntos a chequear por número de ciclos.

Tipo de prueba		Número de ciclos	Número de puntos	Localización de los puntos (% del final del intervalo de medida)
Completa	Evaluación del desempeño	De 3 a 5	6	0-20-40-60-80-100
	Prueba tipo		11	0-10-20-30-40-50-60-70-80-90-100
Simplificada	Prueba de rutina	1	5	0-25-50-75-100

Dado que la selección de los ciclos y números de puntos a chequear a tener en cuenta en la toma de datos constituye otro aspecto novedoso que se incorpora al nuevo proceder, resulta necesario indicar como se introduce la mejora en el proceder de calibración, en relación con este indicador, para la determinación de los errores de indicación, histéresis más la zona muerta, errores de accionamiento de las alarmas y/o de los disparos y respuesta a una entrada paso, lo cual será abordado en los siguientes epígrafes.

3.2.4 Toma de datos para la determinación de los errores de indicación y para la determinación histéresis más la zona muerta.

Se comienza incrementando el valor de la señal de entrada hasta el porcentaje inicial seleccionado (10 %, 20 % o 25 %), transcurrido un tiempo prudencial para la estabilización de la señal se anotan los valores de las señales de entrada y salida, o sea las indicaciones en el calibrador y en el indicador del sistema de medida que se

está calibrando, en el registro diseñado para ello, el cual puede tener la forma indicada en los anexos B y C, posteriormente se incrementa hasta el nuevo valor seleccionado y se espera un tiempo prudencial para la estabilización de la señal, se anotan en el registro los valores que se visualizan en ambos instrumentos de medida; el proceso se repite hasta llegar al valor final seleccionado para la prueba (100 %).

Se aumenta la señal de entrada en un por ciento por encima del valor seleccionado para el último punto a probar y se comienza a descender tomando la primera lectura una vez estabilizado el valor en el último punto seleccionado y se repite el proceso desarrollado anteriormente hasta llegar al punto inicial seleccionado.

Si se realiza una prueba completa se repite el proceder descrito tantas veces como ciclos seleccionados.

3.2.5 Toma de datos para la determinación de los errores de accionamiento de las alarmas y/o de los disparos

Para determinar el error de accionamiento de las alarmas y/o de los disparos, las mediciones se realizarán teniendo en cuenta previamente los valores en que se desea accione la señal de alarma y/o disparo, tanto por alta como por baja. Se irá aplicando lentamente el valor de la variable que accionará la alarma y/o disparo. Esta operación se realizará mediante un suave aumento (Asc) y disminución de los valores (Desc).

3.2.6 Toma de datos para la caracterización del sistema ante la respuesta a una entrada paso.

Para poder determinar la característica dinámica de un sistema de medida hay que aplicar a su entrada una magnitud variable. Esto puede ser de variadas formas, pero lo necesario y suficiente para sistemas de medida lineales es estudiar la respuesta frente a una entrada transitoria (impulso, escalón, rampa), periódica (sinusoidal) o aleatoria (ruido blanco). La elección de una u otra depende del tipo de sensor que se tiene en el sistema. Es difícil por ejemplo tener una temperatura con variación

sinusoidal, pero es fácil producir un cambio brusco de temperatura, a modo de escalón. Las variables de procesos (temperatura y presión) pueden ser analizadas mediante la respuesta a una entrada paso.

La caracterización se realiza aplicando una entrada paso al sistema, que se propone sea con amplitud del 80 % del valor correspondiente al valor final. Se aplica el paso y se anota el tiempo que transcurre en que el sistema llega al 10 %, al 63 %, 90 % y 100 %.

Cuando la calibración del sistema de medida se realiza calibrando inicialmente el sensor y luego la cadena, la caracterización se realiza durante la calibración del sensor.

3.2.7 Procesamiento de los datos

Como resultado de todas las modificaciones y propuestas relacionadas con el nuevo proceder de calibración a los sistemas y cadenas de medida, es imprescindible realizar también un adecuado procesamiento de los datos derivados de las mediciones. En los siguientes epígrafes se abordarán los aspectos relativos a la determinación de los errores, estimación de la incertidumbre asociada a cada medición, procesamiento de los datos y presentación de los resultados.

Para determinar el error en las mediciones cuando se realiza más de un ciclo de mediciones es necesario calcular la media aritmética de las mediciones realizadas en ascenso y la media aritmética para las mediciones en descenso. El error para cada punto (en ascenso y descenso) se determinaría como:

$$E = V_x - \overline{V_p} \quad (3.3)$$

siendo:

E : Error en unidades de la magnitud a medir.

$\overline{V_p}$: Valor promedio de todas las indicaciones del patrón en el punto seleccionado.

V_x : Indicación fijada en el visualizador de salida del sistema.

Cuando se realiza un ciclo de mediciones el error para cada punto (en ascenso y descenso) se determinaría como:

$$E = V_x - V_p \quad (3.4)$$

siendo:

E : Error en unidades de la magnitud a medir.

V_p: Valor de las indicaciones del patrón en el punto seleccionado.

V_x: Indicación fijada en el visualizador de salida del sistema.

Cuando primeramente se calibró el sensor y luego la cadena de medida el error resultante del proceso de calibración para cada punto se determina como:

$$E_{sist} = \sqrt{E_{sensor}^2 + E_{cadena}^2} \quad (3.5)$$

El error en las mediciones (teniendo en cuenta la incertidumbre de la medición) no debe ser mayor que el error máximo permisible del sistema.

El error de accionamiento de las alarmas (E_a) y/o disparos se determina como:

$$E_a = V_n - I_a \quad (3.6)$$

donde:

V_N : Es el valor nominal de comprobación

I_a : Es el valor del accionamiento de la alarma y/o disparo, en ascenso y en descenso.

Para el cálculo del error de histéresis más la zona muerta se determina la máxima diferencia entre las lecturas de ascenso y descenso obtenidas para cada uno de los puntos y se expresa en por ciento del valor máximo del intervalo de medida.

Si el error de histéresis más la zona muerta es especificado por el fabricante debe anotarse al lado del obtenido en la práctica; en ese caso, el obtenido (teniendo en cuenta la incertidumbre) debe ser menor o igual que el dado por el fabricante.

Con los datos tomados durante el proceso de calibración para la determinación de la característica dinámica se plotea el gráfico, representando en el eje “y” a la variable del proceso y en el eje “x” el tiempo.

3.2.8 Estimación de la incertidumbre estándar.

En este epígrafe se aplica el procedimiento general descrito en el epígrafe anterior al caso particular que ocupa a esta investigación, relacionado con la calibración de los sistemas y cadenas de medida, abordando los diferentes casos que se pueden presentar teniendo en cuenta que es posible trabajar: realizando correcciones y sin correcciones y que se pueden realizar uno o varios ciclos de mediciones, aunque el laboratorio rutinariamente trabaja sin correcciones ya que se garantizan las condiciones especificadas en el epígrafe 3.2.

3.2.8.1. Incertidumbre asociada a la determinación de los errores de indicación cuando se realiza más de un ciclo de mediciones.

Siguiendo lo descrito en el capítulo 2, el primer paso es definir el modelo matemático utilizado, aplicable tanto a la determinación del error en ascenso como en descenso:

Expresión del modelo matemático cuando no se utilizan correcciones por certificado en las indicaciones del patrón.

$$E_i = (V_x + \delta_{Tx} + \delta_{Resx} + \delta_{Histx}) - (\bar{V}_p + \delta_{Tp} + \delta_{Resp} + \delta_D + \delta_{Estp}) \quad (3.7)$$

Expresión del modelo matemático cuando se utilizan correcciones por certificado en las indicaciones del patrón.

$$E_i = (V_x + \delta_{Tx} + \delta_{Resx} + \delta_{Histx}) - (\bar{V}_p + \delta_{cp} + \delta_{Tp} + \delta_{Resp} + \delta_D + \delta_{Estp}) \quad (3.8)$$

Donde:

V_x =Indicación fijada en el visualizador de salida del sistema.

δ_{Tx} =Error por temperatura en el visualizador del sistema.

δ_{resx} =Error por resolución en el visualizador del sistema.

δ_{Histx} = Error por histéresis en el visualizador del sistema.

$\overline{V_p}$ =Indicación promedio de las mediciones en el patrón.

δ_{cp} = Corrección del error en el patrón.

δ_{Tx} =Error por temperatura en el patrón.

δ_{resp} =Error por resolución en el patrón.

δ_D =Error por deriva en el patrón.

δ_{Estp} : Error por estabilidad a corto plazo del patrón.

Identificación de las fuentes de incertidumbres cuando no se realizan correcciones del error utilizando los resultados del certificado de calibración.

$$u^2(Ei) = u^2(Res_{I/M}) + u^2(T_{I/M}) + u^2(Hist_{I/M}) + u^2(E_p) + u^2(Obs_p) + u^2(Res_p) \\ + u^2(\Delta D_{maxp}) + u^2(T_p) + u^2(Estp) + u^2(Red) \quad (3.9)$$

Identificación de las fuentes de incertidumbres cuando se realizan correcciones del error utilizando los resultados del certificado de calibración.

$$u^2(Ei) = u^2(Res_{I/M}) + u^2(T_{I/M}) + u^2(Hist_{I/M}) + u^2(U_p) + u^2(Obs_p) + u^2(Res_p) \\ + u^2(\Delta D_{maxp}) + u^2(T_p) + u^2(Estp) + u^2(Red) \quad (3.10)$$

Nota: Al introducir las correcciones no se deben realizar aproximaciones.

u (Res_{I/M}): Fuente de incertidumbre asociada a la resolución o a la apreciación de la indicación en el dispositivo de salida del sistema ó cadena de medida.

u (T_{I/M}): Fuente de incertidumbre asociada a la corrección de las indicaciones por temperatura en el instrumento a calibrar.

u (Hist_{I/M}): Fuente de incertidumbre asociada a la diferencia entre las indicaciones de ascenso y descenso.

u (Obs_p): Fuente de incertidumbre asociada a la variación en observaciones repetidas en el patrón. Se toma en cuenta si esta es mayor que el aporte de la fuente de incertidumbre asociada a la resolución en el patrón.

$u(\Delta D_{\max p})$: Fuente de incertidumbre asociada a la deriva de los patrones.

$u(E_p)$: Fuente de incertidumbre asociada al error del patrón, se tiene en cuenta cuando no se realizan correcciones.

$u(U)$: Fuente de incertidumbre asociada a la incertidumbre del patrón, se tiene en cuenta cuando se utilizan correcciones, se toma del certificado de calibración del patrón.

$u(R_{\text{esp}})$: Fuente de incertidumbre asociada a la resolución en el patrón, se tiene en cuenta cuando esta es mayor que el aporte de la fuente de incertidumbre asociada a la variación en observaciones repetidas en el patrón.

$u(T_p)$: Fuente de incertidumbre asociada a la corrección de las indicaciones por temperatura en el patrón.

$u(\text{Est}_p)$: Fuente de incertidumbre asociada a la estabilidad del patrón (si es proporcionado por el fabricante).

$u(\text{Red})$: Fuente de incertidumbre asociada al redondeo del resultado final del error.

Durante la evaluación de las fuentes de incertidumbres, se tiene que al realizar la calibración cumpliendo las exigencias planteadas en el epígrafe 3.2.1, se garantiza estar trabajando en las condiciones especificadas de temperatura de los instrumentos de medida patrones y de los que conforman el sistema, por lo que las contribuciones de estas fuentes son cero ($u(T_{IM})$ y $u(T_p)$). El resto de las fuentes se evalúan de la forma siguiente:

- incertidumbre asociada a la resolución o a la apreciación de la indicación en el dispositivo de salida del sistema ó cadena de medida (u_1): asume una distribución rectangular y se determina mediante las expresiones descritas en (2.11) y (2.12), según sea la indicación.
- Incertidumbre asociada a la incertidumbre del patrón (u_2): asume la distribución asignada en el certificado de calibración, y se determina mediante la expresión descrita en (2.6).

- Incertidumbre asociada al error máximo permisible del patrón (u_3): se determina utilizando la ecuación descrita en (2.10), asumiendo una distribución rectangular.
- Incertidumbre asociada a las variaciones en observaciones repetidas (u_4). Esta fuente aparece cuando se realizan varias mediciones y es preciso promediar, asume una distribución normal y se determinará para cada punto como se describe en las expresiones (2.2) a (2.6).
- Incertidumbre asociada a la deriva del patrón (u_5). Esta fuente se determina utilizando la expresión descrita en (2.7), asumiendo una distribución rectangular.

Si no se realizan correcciones del error por certificado y se garantiza que el instrumento de medida patrón sea calibrado en un período de tiempo tal, que su error sumado a la deriva sea menor que su error máximo permitido, entonces u_5 no se tiene en cuenta, ya que estaría contenida dentro de la incertidumbre asociada al error máximo permitido.

- Incertidumbre asociada a la resolución o a la apreciación de la indicación en el patrón (u_6): se determina asumiendo una distribución rectangular, mediante las expresiones (2.11) y (2.12), según sea la indicación.
- Incertidumbre asociada a la histéresis dada por la diferencia entre las indicaciones en ascenso y descenso (u_7). Se determina asumiendo una distribución rectangular, mediante las expresión (2.11) sustituyendo "R" por "H"
- Incertidumbre asociada a la estabilidad del patrón (u_8). Se tiene en cuenta cuando el dato es proporcionado por el fabricante. Se determina asumiendo una distribución rectangular, mediante la expresión (2.11) sustituyendo "R" por "Est"
- Incertidumbre asociada al redondeo del resultado final (u_9). Se considera que asuma una distribución rectangular y se determina su contribución de la forma descrita en la ecuación (2.13), siendo Δ el máximo valor de redondeo según el criterio asumido.

Si se utilizaran varios dispositivos patrones simultáneamente para realizar el proceso

de medición se determina la incertidumbre estándar combinada que aporta cada uno y se combinan aplicando la ley de propagación de la incertidumbre (2.18), para obtener u_2, u_3, u_5, u_6 y u_8 .

Para la determinación de la incertidumbre estándar combinada asociada a la calibración cuando no se utilizan correcciones y se realiza más de un ciclo de mediciones se tienen los casos siguientes:

- Si el aporte de la incertidumbre asociada a las observaciones repetidas (u_4) es mayor que el aporte de la incertidumbre asociada a la resolución (u_6), para la determinación de la incertidumbre estándar combinada (u_{ec}) se utiliza la expresión siguiente:

$$u_{ec} = \sqrt{u_1^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.11)$$

- Si el aporte de la incertidumbre asociada a la resolución (u_6) es mayor que el aporte de la incertidumbre asociada a las observaciones repetidas (u_4), para la determinación de la incertidumbre estándar combinada (u_{ec}) se utiliza la expresión siguiente:

$$u_{ec} = \sqrt{u_1^2 + u_3^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.12)$$

En la determinación de la incertidumbre estándar combinada asociada a la calibración cuando se utilizan correcciones y se realiza más de un ciclo de mediciones se analizan las siguientes posibilidades:

- Si el aporte de la incertidumbre asociada a las observaciones repetidas (u_4) es mayor que el aporte de la incertidumbre asociada a la resolución (u_6) entonces para la determinación de la incertidumbre estándar combinada (u_{ec}) se utiliza la expresión siguiente:

$$u_{ec} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.13)$$

- Si el aporte de la incertidumbre asociada a la resolución (u_6) es mayor que el aporte de la incertidumbre asociada a las observaciones repetidas (u_4),

entonces:

$$uec = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.14)$$

Aplicando la ecuación (2.23) se determina la incertidumbre expandida asociada a la calibración.

$$U_{(e)} = k * uec \quad (3.15)$$

Donde: “k” (factor de cobertura)

Consideraciones para la aplicación de la nueva estimación de la incertidumbre

1. Si en la incertidumbre combinada uec predomina una evaluación tipo A, (u_4), es necesario evaluar el valor de “k” en función de los grados efectivos de libertad, utilizando la ecuación de Welch-Satterthwaite (2.22) y (2.23); pero si se cumple que $uec > 2 * u_{tipo A}$, el factor de cobertura que garantiza una probabilidad de cobertura del 95 % aproximadamente, es $k=2$.
2. Si en la incertidumbre combinada uec predomina una evaluación tipo B, con función de distribución rectangular y se cumple la relación establecida en (2.26), entonces $k=1,65$.
3. Si en la incertidumbre combinada uec predominan dos evaluaciones tipo B, con función de distribución rectangular entonces es necesario utilizar las relaciones establecidas en (2.27) a (2.29).
4. Si en la incertidumbre combinada uec el aporte de todas las fuentes es similar, se considera como salida una distribución normal y la consideración de $k=2$ es acertada.

Siempre que se elija correctamente el instrumento de medida patrón y la relación $T/2U$ se aproxima a 10, teniendo este un adecuado establecimiento de su período de calibración, si no predomina una evaluación tipo A, o su contribución a la incertidumbre combinada sea similar a la que aporta la resolución del sistema, predominará esta última, representando una distribución rectangular.

3.2.8.2. Incertidumbre asociada a la determinación de los errores de indicación cuando se realiza un ciclo de mediciones.

Expresión del modelo matemático cuando se utilizan correcciones por certificado en las indicaciones del patrón.

$$E_i = (V_x + \delta_{Tx} + \delta_{Resx} + \delta_{Histx}) - (V_p + \delta_{cp} + \delta_{Tp} + \delta_{Resp} + \delta_D + \delta_{Estp}) \quad (3.16)$$

Expresión del modelo matemático cuando no se utilizan correcciones por certificado en las indicaciones del patrón.

$$E_i = (V_x + \delta_{Tx} + \delta_{Resx} + \delta_{Histx}) - (V_p + \delta_{Tp} + \delta_{Resp} + \delta_D + \delta_{Estp}) \quad (3.17)$$

Siendo:

V_x =Indicación fijada en el visualizador de salida del sistema.

δ_{Tx} =Error por temperatura en el visualizador del sistema.

δ_{resx} =Error por resolución en el visualizador del sistema.

δ_{Tp} =Error por temperatura en el patrón.

δ_{Histx} = Error por histéresis en el visualizador del sistema.

V_p =Indicación de las mediciones en el patrón

δ_{cp} = Corrección del error en el patrón.

δ_{resp} =Error por resolución en el patrón.

δ_D =Error por deriva en el patrón.

δ_{Estp} : Error por estabilidad a corto plazo del patrón.

Cuando no se utilizan correcciones por certificado en las indicaciones del patrón, se identifican las siguientes fuentes de incertidumbres.

$$u^2(E_i) = u^2(Res_{I/M}) + u^2(T_{I/M}) + u^2(Hist_{I/M}) + u^2(E_p) + u^2(Res_p) + u^2(\Delta D_{maxp}) + u^2(T_p) + u^2(Estp) + u^2(Red) \quad (3.18)$$

Cuando se utilizan correcciones por certificado en las indicaciones del patrón se

identifican las siguientes fuentes de incertidumbres.

$$u^2(E_i) = u^2(Res_{I/M}) + u^2(T_{I/M}) + u^2(Hist_{I/M}) + u^2(U_p) + u^2(Res_p) + u^2(\Delta D_{maxp}) + u^2(T_p) + u^2(Est_p) + u^2(Red) \quad (3.19)$$

u (Res_{I/M}): Fuente de incertidumbre asociada a la resolución o a la apreciación de la indicación en el dispositivo de salida del sistema ó cadena de medida.

u (T_{I/M}): Fuente de incertidumbre asociada a la corrección de las indicaciones por temperatura en el instrumento a calibrar.

u (Hist_{I/M}): Fuente de incertidumbre asociada a la diferencia entre las indicaciones de ascenso y descenso.

u (ΔD_{maxp}): Fuente de incertidumbre asociada a la deriva de los patrones.

u (Ep): Fuente de incertidumbre asociada al error máximo permisible del patrón. Se tiene en cuenta cuando no se realizan correcciones.

u (Up): Fuente de incertidumbre asociada a la incertidumbre combinada del patrón, reportada en el certificado da calibración. Se tiene en cuenta cuando se utilizan correcciones.

u (Resp): Fuente de incertidumbre asociada a la resolución en el patrón.

u (Tp): Fuente de incertidumbre asociada a la corrección de las indicaciones por temperatura en el patrón.

u (Est_p): Fuente de incertidumbre asociada a la estabilidad del patrón (si es proporcionado por el fabricante).

U (Red): Fuente de incertidumbre asociada al redondeo del resultado final.

Para la determinación de la incertidumbre estándar combinada asociada a la calibración cuando no se realizan correcciones por certificado de las indicaciones del patrón y se realiza un ciclo de mediciones se utiliza la expresión (3.12) y cuando se utilizan correcciones y se realiza un ciclo de mediciones se utiliza la expresión (3.14).

La determinación de la incertidumbre expandida asociada a la calibración se realiza de forma análoga a lo descrito anteriormente en el epígrafe 3.2.8.1.

3.2.8.3. Incertidumbre asociada a la determinación de los errores de indicación cuando se calibran el sensor y la cadena por separados.

Cuando se calibra primeramente el sensor y luego la cadena, se determina la incertidumbre combinada asociada a la calibración del sensor y la incertidumbre combinada asociada a la calibración de la cadena como se ha detallado anteriormente en los epígrafes 3.2.8.1 y 3.2.8.2, hasta el cálculo de la incertidumbre combinada y luego se combinan los resultados aplicando la ley de propagación de la incertidumbre.

La determinación de la incertidumbre expandida asociada a la calibración se obtiene multiplicando el valor obtenido por el factor de cobertura "k" seleccionado.

3.2.8.4. Incertidumbre asociada a la determinación de los errores de accionamiento de las alarmas y los disparos.

Expresión del modelo matemático sin aplicar correcciones por certificado en las indicaciones del patrón.

$$Ea_i = V_n - (I_a + \delta_D + \delta_{resp} + \delta_{Tp} + \delta_{Estp}) \quad (3.20)$$

Donde:

Ea_i : error de accionamiento en el punto i-ésimo.

V_n : Es el valor nominal de comprobación.

I_a : Es el valor del accionamiento de la alarma y/o disparo (para el ascenso y para el descenso)

Expresión del modelo matemático cuando se aplican correcciones por certificado en las indicaciones del patrón.

$$Ea_i = V_n - (I_a + \delta_{cp} + \delta_D + \delta_{resp} + \delta_{Tp} + \delta_{Estp}) \quad (3.21)$$

Identificación de las fuentes de incertidumbres. Evaluación.

Sin correcciones por certificado de calibración del patrón.

$$u^2(Ea_i) = u^2(Ep) + u^2(Res_p) + u^2(\Delta Dmax_p) + u^2(T_p) + u^2(Est_p) + u^2(Red) \quad (3.22)$$

Con correcciones por certificado de calibración del patrón.

$$u^2(Ea_i) = u^2(U_p) + u^2(Res_p) + u^2(\Delta Dmax_p) + u^2(T_p) + u^2(Est_p) + u^2(Red) \quad (3.23)$$

Al realizar la calibración cumpliendo las exigencias planteadas en el epígrafe 3.2.1 se garantiza estar trabajando en las condiciones especificadas de temperatura de los instrumentos de medida patrones y los que conforman el sistema, por lo que la contribución de esta fuente es cero ($u(T_p)$).

- Fuente de incertidumbre asociada a la incertidumbre del patrón (u_2): está presente cuando se aplican correcciones por certificado en las indicaciones del patrón, asume una distribución normal, y se determina según la ecuación (2.6).
- Fuente de incertidumbre asociada al error máximo permisible del patrón (u_3): siempre que no se aplican correcciones en las indicaciones del patrón por certificado, se determina asumiendo una distribución rectangular, utilizando la ecuación descrita en (2.10)
- Fuente de incertidumbre asociada a la deriva del patrón (u_5). La incertidumbre estándar asume una distribución rectangular y se determina utilizando la expresión (2.7).
- Si no se realizan correcciones del error por certificado y se garantiza que el instrumento de medida patrón sea calibrado en un período de tiempo tal, que su error sumado a la deriva sea menor que su error máximo permitido, entonces u_5 no se tiene en cuenta, ya que estaría contenida dentro de la incertidumbre asociada al error máximo permitido

- Fuente de incertidumbre asociada a la resolución del patrón, (u_6) cuando las variaciones en observaciones repetidas son menores que el aporte de esta fuente. Esta incertidumbre estándar, asume una distribución rectangular y se determina mediante la expresión descrita en (2.11).
- Fuente de incertidumbre asociada a la estabilidad del patrón (u_8). Se tiene en cuenta cuando es proporcionada la información por el fabricante. Se determina asumiendo una distribución rectangular, mediante la expresión (2.11) sustituyendo "R" por "Est"
- Fuente de incertidumbre asociada al redondeo del resultado final (u_9). Se considera que asuma una distribución rectangular y se determina su contribución de la forma descrita en la ecuación (2.13), siendo Δ el máximo valor de redondeo según el criterio asumido.

Si se utilizaran varios dispositivos patrones simultáneamente para realizar el proceso de medición se determina la incertidumbre estándar combinada que aporta cada uno y se combinan aplicando la ley de propagación de la incertidumbre (2.18), para obtener u_2 , u_3 , u_5 , u_6 y u_8 .

La evaluación de las fuentes de incertidumbres y la determinación de la incertidumbre expandida se realiza de forma análoga a lo descrito en el acápite 3.2.8.1.

La determinación de la incertidumbre estándar combinada sin aplicar correcciones se realiza según la ecuación (3.24) y cuando se aplican correcciones se realiza según la expresión (3.25).

$$u_{ec} = \sqrt{u_3^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.24)$$

$$u_{ec} = \sqrt{u_2^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.25)$$

3.2.8.5. Incertidumbre asociada a la determinación del error de histéresis más la zona muerta.

Expresión del modelo matemático sin aplicar correcciones.

$$Z_{mi} = (L_{asc} + \delta_{resp} + \delta_D + \delta_{TP} + \delta_{Estp}) - (L_{desc} + \delta_{resp} + \delta_D + \delta_{TP} + \delta_{Estp}) \quad (3.26)$$

Donde:

Z_{mi} : Zona muerta en el punto i -ésimo de la medición.

L_{asc} : Lectura de la indicación en el patrón en ascenso.

L_{desc} : Lectura de la indicación en el patrón en descenso.

Expresión del modelo matemático cuando se aplican correcciones por certificado del patrón.

$$Z_{mi} = (L_{asc} + \delta_{cp} + \delta_{resp} + \delta_D + \delta_{TP} + \delta_{Estp}) - (L_{desc} + \delta_{cp} + \delta_{resp} + \delta_D + \delta_{TP} + \delta_{Estp}) \quad (3.27)$$

Identificación y evaluación de las fuentes de incertidumbres.

Sin correcciones

$$u^2(E_{ai}) = 2 * [u^2(Resp) + u^2(\Delta D_{maxp}) + u^2(Tp) + u^2(E_{stp})] + u^2(E_{pasc}) + u^2(E_{pdesc}) + u^2(Red) \quad (3.28)$$

Con correcciones

$$u^2(E_{ai}) = 2 * [u^2(Resp) + u^2(\Delta D_{maxp}) + u^2(Tp) + u^2(E_{stp})] + u^2(U_{pasc}) + u^2(U_{pdesc}) + u^2(Red) \quad (3.29)$$

Donde:

E_{pasc} : Error del patrón cuando se toman lecturas en ascenso.

E_{pdesc} : Error del patrón cuando se toman lecturas en descenso.

U_{pasc} : Incertidumbre asociada a las mediciones con el patrón cuando se toman

lecturas en ascenso.

Updesc: Incertidumbre asociada a las mediciones con el patrón cuando se toman lecturas en descenso.

Al realizar la calibración cumpliendo las exigencias planteadas en el epígrafe 3.2.1 se garantiza estar trabajando en las condiciones especificadas de temperatura de los instrumentos de medida patrones y los que conforman el sistema, por lo que la contribución de esta fuente es cero ($u(T_p)$).

- Fuente de incertidumbre asociada al error máximo permisible del patrón (u_3), siempre que no se aplican correcciones, se determina asumiendo una distribución rectangular, utilizando la ecuación descrita en (2.10).
- Fuente de incertidumbre asociada a la resolución del patrón, (u_6) cuando las variaciones en observaciones repetidas son menores que el aporte de esta fuente. Esta incertidumbre estándar, asume una distribución rectangular, se determina por la ecuación (2.11).
- Fuente de incertidumbre asociada a la deriva del patrón (u_5). La incertidumbre estándar, asumiendo una distribución rectangular, se determina utilizando la ecuación (2.7).
- Si no se realizan correcciones del error por certificado y se garantiza que el instrumento de medida patrón sea calibrado en un período de tiempo tal, que su error sumado a la deriva sea menor que su error máximo permitido, entonces u_5 no se tiene en cuenta, ya que estaría contenida dentro de la incertidumbre asociada al error máximo permitido.
- Fuente de incertidumbre asociada a la incertidumbre del patrón (u_2), se determina según la ecuación (2.6) asumiendo una distribución normal (siempre que $k=2$), cuando se aplican correcciones en las mediciones.
- Fuente de incertidumbre asociada a la estabilidad del patrón (u_8). El dato es aportado por el fabricante. Se determina asumiendo una distribución rectangular,

mediante la expresión (2.11) sustituyendo "R" por "Est."

- Fuente de incertidumbre asociada al redondeo del resultado final (u_9). Se considera que asuma una distribución rectangular y se determina su contribución de la forma descrita en la ecuación (2.13), siendo Δ el máximo valor de redondeo según el criterio asumido.

Si se utilizaran varios dispositivos patrones simultáneamente para realizar el proceso de medición se determina la incertidumbre estándar combinada que aporta cada uno y se combinan aplicando la ley de propagación de la incertidumbre (2.18), para obtener u_2 , u_3 , u_5 , u_6 y u_8 .

La determinación de la incertidumbre estándar combinada cuando no se aplican correcciones por certificado en las indicaciones del patrón se realiza según:

$$u_{ec} = \sqrt{2 * u_6^2 + u_3 asc^2 + u_3 desc^2 + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.30)$$

Para el caso en que en la determinación de la incertidumbre que aporta el error, no influya el valor medido, entonces:

$$u_{ec} = \sqrt{2 * [u_3^2 + u_6^2] + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.31)$$

La determinación de la incertidumbre estándar combinada cuando se aplican correcciones se realiza según:

$$u_{ec} = \sqrt{2 * [u_5^2 + u_6^2 + u_8^2] + u_2 asc^2 + u_2 desc^2 + u_9^2} \quad (3.32)$$

Si en el certificado del patrón la incertidumbre para las lecturas en ascenso y en descenso es la misma entonces:

$$u_{ec} = \sqrt{2 * [u_2^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_8^2] + u_9^2} \quad (3.33)$$

La determinación de la incertidumbre expandida se realiza de forma análoga a lo descrito en el epígrafe 3.2.8.1.

En este caso hay que tener presente que, siempre que se trabaje con el patrón adecuado que garantice la exactitud y estabilidad requerida, y se apliquen

correctamente las técnicas de redondeo, en la determinación de la incertidumbre combinada predomina la incertidumbre que aporta la resolución del instrumento de medida que se calibra (cuando se toman las lecturas en ascenso y en descenso), por lo que hay que tenerla en cuenta dos veces, estando en presencia del predominio de dos evaluaciones tipo B, con la particularidad que son iguales, o sea $a_1=a_2$, por lo que $\beta=0$, representando siempre a una distribución triangular.

3.2.8.6. Incertidumbre asociada a la determinación de la respuesta a la entrada paso.

Expresión del modelo matemático. Como se lee el tiempo una vez llegado a un nivel de indicación de la variable que se mide en el patrón, se realizan dos lecturas simultáneas (nivel de indicación de la variable y del tiempo).

Sin aplicar correcciones:

$$t_i = t + \delta_{error} + \delta_{res} + \delta_D + \delta_{Tp} + \delta_{Estp} \quad (3.34)$$

$$V_i = V + \delta_{error} + \delta_{res} + \delta_D + \delta_{Tp} + \delta_{Estp} \quad (3.35)$$

Aplicando correcciones:

$$t_i = t + \delta_{cp} + \delta_{res} + \delta_D + \delta_{Tp} + \delta_{Estp} \quad (3.36)$$

$$V_i = V + \delta_{cp} + \delta_{res} + \delta_D + \delta_{Tp} + \delta_{Estp} \quad (3.37)$$

Donde V_i y t_i : Valor de la variable de medición y del tiempo en el punto i -ésimo de la medición.

Identificación de las fuentes de incertidumbres. Evaluación.

Sin correcciones

$$u(t_i) = u(E_{t_i}) + u(\text{Re } s_{t_i}) + u(\Delta D \max_{t_i}) + u(T_{pt_i}) + u(Est_{t_i}) + u(\text{Re } d_{t_i}) \quad (3.38)$$

$$u(V_i) = u(E_{V_i}) + u(\text{Re } s_{V_i}) + u(\Delta D \max_{V_i}) + u(T_{pV_i}) + u(Est_{V_i}) + u(\text{Re } d_{V_i}) \quad (3.39)$$

Con correcciones

$$u(t_i) = u(U_{t_i}) + u(\text{Res}_{t_i}) + u(\Delta D_{\max_{t_i}}) + u(T_{pt_i}) + u(\text{Est}_{t_i}) + u(\text{Re}d_{t_i}) \quad (3.40)$$

$$u(V_i) = u(U_{V_i}) + u(\text{Res}_{V_i}) + u(\Delta D_{\max_{V_i}}) + u(T_{pV_i}) + u(\text{Est}_{V_i}) + u(\text{Re}d_{V_i}) \quad (3.41)$$

Al realizar la calibración cumpliendo las exigencias planteadas en el epígrafe 3.2.1 se garantiza estar trabajando en las condiciones especificadas de temperatura de los instrumentos de medida patrones y los que conforman el sistema, por lo que la contribución de esta fuente es cero ($u(T_p)$).

- $u(E_{t_i})$: Fuente de incertidumbre asociada al error máximo permisible del patrón de tiempo (u_3).
- $u(\text{Res}_{t_i})$: Fuente de incertidumbre asociada a la resolución o a la apreciación de la indicación en el patrón de tiempo (u_6).
- $u(\Delta D_{\max_{t_i}})$: Fuente de incertidumbre asociada a la deriva del patrón de tiempo (u_5).

Si no se realizan correcciones del error por certificado y se garantiza que el instrumento de medida patrón sea calibrado en un período de tiempo tal, que su error sumado a la deriva sea menor que su error máximo permitido, entonces u_5 no se tiene en cuenta, ya que estaría contenida dentro de la incertidumbre asociada al error máximo permitido.

- $u(E_{pV})$: Fuente de incertidumbre asociada al error máximo permisible del patrón utilizado para medir la variable del sistema que se calibra (presión, temperatura, tensión, etc) ($u_{3.2}$).
- $u(\text{Res}_V)$: Fuente de incertidumbre asociada a la resolución o a la apreciación de la indicación en el patrón utilizado para medir la variable del sistema que se calibra ($u_{6.2}$).
- $u(\Delta D_{\max_{pV}})$: Fuente de incertidumbre asociada a la deriva del patrón utilizado para medir la variable del sistema que se calibra ($u_{5.2}$).

- u (U_{pt}): Fuente de incertidumbre asociada a la incertidumbre del patrón de tiempo (u_2).
- u (U_{pv}): Fuente de incertidumbre asociada a la incertidumbre del patrón utilizado para medir la variable del sistema que se calibra (presión, temperatura, tensión, etc) ($u_{2.2}$).
- u (Est_t): Fuente de incertidumbre asociada a la estabilidad del patrón que mide el tiempo (u_8).
- u (Est_v): Fuente de incertidumbre asociada a la estabilidad del patrón que mide la variable del proceso ($u_{8.2}$).
- u (Red_t): Fuente de incertidumbre asociada al redondeo del resultado final en la medición del tiempo u_9 .
- u (Red_v): Fuente de incertidumbre asociada al redondeo del resultado final en la medición del tiempo $u_{9.2}$.

La evaluación de las fuentes de incertidumbres se realiza de la forma siguiente:

- Fuente de incertidumbre asociada al error máximo permisible del patrón (u_3 y $u_{3.2}$), se determina asumiendo una distribución rectangular, utilizando la ecuación descrita en la ecuación (2.10).
- Fuente de incertidumbre asociada a la incertidumbre del patrón (u_2 y $u_{2.2}$), se determina según la ecuación (2.6).
- Fuente de incertidumbre asociada a la resolución o a la apreciación de la indicación en el patrón (u_6 y $u_{6.2}$), cuya incertidumbre estándar, asumiendo una distribución uniforme, se determina por las ecuaciones (2.11) y (2.12), según sea la indicación.
- Asociada a la deriva del patrón (u_5 y $u_{5.2}$). La incertidumbre estándar, asumiendo una distribución rectangular, se determina utilizando la ecuación (2.7).
- Fuente de incertidumbre asociada a la estabilidad del patrón (u_8 y $u_{8.2}$). Se tiene

en cuenta cuando el dato es aportado por el fabricante. Se determina asumiendo una distribución rectangular, mediante la expresión (2.11) sustituyendo "R" por "Est".

- Fuente de incertidumbre asociada al redondeo del resultado final (u_9 y $u_{9,2}$). Se considera que asuma una distribución rectangular y se determina su contribución de la forma descrita en la ecuación (2.13), siendo Δ el máximo valor de redondeo según el criterio asumido.

Si se utilizaran varios dispositivos patrones simultáneamente para realizar el proceso de medición se determina la incertidumbre estándar combinada que aporta cada uno y se combinan aplicando la ley de propagación de la incertidumbre (2.18), para obtener u_2 , u_3 , u_5 , u_6 y u_8 .

La determinación de la incertidumbre estándar combinada cuando no se aplican correcciones, en el patrón de tiempo se determina según:

$$u_{ect} = \sqrt{u_3^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_9^2} \quad (3.41)$$

En el patrón que mide la variable del proceso:

$$u_{ecv} = \sqrt{u_{3,2}^2 + u_{5,2}^2 + u_{6,2}^2 + u_{9,2}^2} \quad (3.42)$$

La determinación de la incertidumbre estándar combinada cuando se aplican correcciones en los patrones:

$$u_{ect} = \sqrt{u_2^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_8^2 + u_9^2} \quad (3.43)$$

$$u_{ecv} = \sqrt{u_{2,2}^2 + u_{5,2}^2 + u_{6,2}^2 + u_{8,2}^2 + u_{9,2}^2} \quad (3.44)$$

3.3. Procesamiento de los datos y presentación de los resultados.

Como salida del proceso de calibración la primera evidencia que se genera es el acta de calibración (anexos B y C), en ella se toman los datos para su posterior procesamiento, el cual se realiza utilizando hojas de cálculo en Excel, las cuales se encuentran protegidas contra cambios.

Para introducir los datos necesarios se utiliza la hoja denominada "Datos", los cuales se introducen en las celdas coloreadas, estas últimas se activan cuando se cumplen las condicionantes programadas en las celdas especificadas.

El procesamiento de los resultados de los datos tomados en el proceso de calibración se realiza en hojas de cálculo diferentes en dependencia de la nomenclatura que se calibró, (se realizó para la nomenclatura presión) las cuales son transparentes para el usuario, o sea no tienen que interactuar con ellas.

En dicha programación se incluyó la emisión automática del Certificado de Calibración, el cual cumple con las exigencias de la NC-ISO/IEC 17025:2006, y contiene el resultado de las mediciones, con la incertidumbre asociada al proceso de cada medición (anexo D).

El valor numérico del resultado de la medición debe redondearse en su expresión final a la menor cifra significativa del valor de la incertidumbre expandida asignada al resultado de la medición. El valor numérico de la incertidumbre de medida debe expresarse, con dos cifras significativas diferentes de cero.

La secuencia seguida para la programación de las hojas de cálculo utilizadas se muestra en el anexo E.

En el anexo F se muestra un ejemplo de aplicación práctica utilizando las hojas de cálculo en Excel diseñadas.

3.4. Conclusiones parciales

A partir del procedimiento existente y teniendo en cuenta la investigación realizada se elaboró un nuevo procedimiento para realizar la calibración metrológica de los sistemas y cadenas de medida, dando así cumplimiento al objetivo trazado. En dicho procedimiento se puede constatar que:

1. Para el proceso de medición el número de puntos a seleccionar así como los ciclos a realizar, se seleccionan estableciendo un compromiso entre la objetividad, relevancia, costo y dificultades técnicas de las mediciones a realizar,

entre otros factores, de acuerdo siempre con las necesidades del cliente. Se propone realizar una de las pruebas completas cuando se realiza el ajuste previo a la calibración de un sistema de nuevo montaje y la simplificada a los ajustes y calibración de rutina.

2. Se deben seleccionar los patrones de modo que se cumpla que la relación entre la incertidumbre del sistema de medida y la incertidumbre expandida sea al menos de 4 veces, para garantizar un 95 % de confianza.
3. Siempre que se elija correctamente el instrumento de medida patrón y la relación $T/2U$ se aproxima a 10, teniendo este un adecuado establecimiento de su período de calibración, si no predomina una evaluación tipo A, o su contribución a la incertidumbre combinada sea similar a la que aporta la resolución del sistema, predominará esta última, representando una distribución rectangular.
4. En la determinación de la incertidumbre estándar combinada asociada al proceso de medición para el cálculo de la histéresis más la zona muerta, predomina la incertidumbre que aporta la resolución del sistema o cadena de medida que se calibra (cuando se toman las lecturas en ascenso y en descenso), por lo que hay que tenerla en cuenta dos veces, estando en presencia del predominio de dos evaluaciones tipo B, con la particularidad que son iguales, o sea $a_1=a_2$, por lo que $\beta=0$, representando siempre a una distribución triangular, con $k=1,90$.

CONCLUSIONES

- Como resultado del análisis del marco teórico, se concluye que la metrología está íntimamente relacionada con la teoría estadística, siendo importante dominar con claridad los términos y conceptos asociados con la metrología y las definiciones estadísticas, dado que estos elementos resultan básicos para el procesamiento de los datos generados en el proceso de calibración.
- Se demuestra que la metrología industrial garantiza la calidad de las mediciones en los procesos productivos y de servicios, y de manera particular en un laboratorio de calibración.
- La calidad del proceso de calibración viene dada por los niveles de incertidumbres con que se realizan las mediciones, y por los procedimientos que se aplican, no siendo posible en muchos casos mejorar esos niveles por la escasez de recursos, fundamentalmente de instrumentos de medida patrones de alta exactitud.
- La relación Tolerancia Incertidumbre (TUR) proporciona un buen criterio a la hora de seleccionar el instrumento adecuado para una medida y de este modo garantizar la capacidad de medición requerida óptima.
- La propuesta de modificaciones al proceder para la determinación de la incertidumbre de la medición garantiza evaluar un valor real del factor de cobertura que incide positivamente en el resultado de la medición.
- Es necesario tener en cuenta el principio, el método, el personal y el nuevo procedimiento de evaluación de la incertidumbre propuesto ya que son determinantes para obtener el valor de la incertidumbre de la medición.
- Para la aplicación adecuada de esta propuesta de modificaciones, hay que tener presente las indicaciones relativas a las correcciones en la medición, observaciones repetidas, resolución y el valor de factor de cobertura “k”.
- En el nuevo procedimiento propuesto para realizar la calibración metrológica de los sistemas y cadenas de medida, queda demostrado que para el proceso de medición, el número de puntos a seleccionar así como los ciclos a realizar,

se seleccionan estableciendo un compromiso entre la objetividad, relevancia, costo y dificultades técnicas de las mediciones a realizar, entre otros factores.

- Durante la evaluación de los resultados, se demuestra que en la determinación de la incertidumbre estándar combinada asociada al proceso de medición para el cálculo de la histéresis más la zona muerta, predomina la incertidumbre que aporta la resolución del sistema o cadena de medida que se calibra (cuando se toman las lecturas en ascenso y en descenso), por lo que hay que tenerla en cuenta dos veces, estando en presencia del predominio de dos evaluaciones tipo B, con la particularidad que los parámetros de la función trapezoidal sean $a_1=a_2$ ($\beta=0$), representando siempre a una distribución triangular, con factor de cobertura de 1,90.
- Gracias a la evaluación de los resultados derivados del nuevo procedimiento propuesto para realizar la calibración metrológica de los sistemas y cadenas de medida, se puede confeccionar una Norma Cubana que contemple todos los elementos necesarios para la prestación de este servicio metrológico.

RECOMENDACIONES

Se propone que, empleando la propuesta de algoritmo utilizado en las hojas de cálculo en Excel presentadas en este trabajo, se realice un software para el procesamiento de los resultados que tenga como premisa la utilización de un software libre en su programación.

Partiendo de los resultados de esta investigación tramitar la propuesta de Norma Cubana para la calibración de sistemas y cadenas de medidas en el Comité Técnico de Normalización de la UNE.

Proponer nueva versión del procedimiento "Trazabilidad e incertidumbre de las mediciones (UT-MP-0003)" del Sistema de Gestión de las Mediciones de la UNE.
[64]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Beamex, «Mejoras del rendimiento de centrales eléctricasp or medio de la calibración,» *Beamex*, vol. III, 2008.
- [2] Beamex, «Calibraciones trazables y eficientes en la industria de proceso,» *Beamex*, vol. II, p. 8p, 2008.
- [3] M. D. Del Campo Maldonado y J. A. Robles Carbonel, «La metrología, motor de innovación tecnológica y desarrollo industrial,» *e-medida*, vol. II, p. 5, Febrero 2012.
- [4] H. Delgado Alamilla , G. . E. I. Martínez Peña, A. Pérez Salazar y M. Flores Flores, «Estimación de la incertidumbre en métodos de ensayos de construcción.,» Secretaría de Comunicaciones y Transporte, México, 2005.
- [5] B. Soriano, V. Aranda y N. Gutierrez, «Determinación de intervalos de calibración,» *La Guía MetAs*, vol. X, p. 7, Octubre 2004.
- [6] NC-ISO , *10012. Sistema de Gestión de las mediciones-Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición*, Cuba: ONN, 2007, p. 31p.
- [7] NC ISO-IEC/OIML, *Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)*, ONN, 2008.
- [8] S. . Iglesias Valcárcel, I. Ayala Ávila;, K. Uyema Tsuhako, Y. Macías Quero y R. Sosa Vera., «Incidencia de la metrologia en la gestión de la I+D+i,» vol. 1, nº 1, 2012.
- [9] ONN, *Decreto Ley 183. De la Metrología*, G. O. d. I. R. d. Cuba, Ed., La Habana, 1998.
- [10] NC-ISO-IEC , *17025. Requisitos generales para la competencia de los laboratoris de ensayos y de calibración.*, 2 ed., 2006, p. 41p.
- [11] E. R. Pérez Montoya, «Las medidas de la calidad,» 26 Noviembre 2012.
- [12] J. G. Rodríguez Cardona, «Concepción de un SGM para la Unión Eléctrica de Cuba.,» *Normalización*, Vols. %1 de %22-3, pp. 16-23, 2008.
- [13] Colectivo de autores de la Unión Eléctrica, *UD-MM 0001Manual de Metrología de la UNE*, La Habana, 2010.
- [14] T. Garcia Rodríguez, A. Tejeda Martín y E. Veitía Alvarez, *ICV-G-01:Instrucción de calibración de cadenas y sistemas de medida.*, Santa Clara, 2012, p. 22.

- [15] IEC, 61298-2. *Process measurement and control devices. General methods and procedures for evaluating performance. Part 2. Test under referent conditions*, 2.0 ed., Geneva: IEC, 2008, p. 58.
- [16] Comisión de Laboratorios Asociados del Consejo Superior de Metrología. Centro Español de Metrología., *La metrología científica en España y en su entorno europeo. Rev 1*, 1 ed., España: CEM, 2007, p. 114.
- [17] MetAs & Metrologos Asociados, «El proceso de medición,» *La Guía MetAs*, nº 9, p. 6, Septiembre 2007.
- [18] NC-ISO, 9001. *Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos.*, 4 ed., La Habana: ONN, 2008, p. 45.
- [19] NC-ISO, 14001. *Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para el uso.*, 1 ed., La Habana: ONN (NC), 2005, p. 41.
- [20] E. Prieto, *Breve historia de la metrología*, España, 2003, p. 14.
- [21] O. Inastrilla Armayor, *Un enfoque histórico para la sistematización de la metrología en Cuba*, La Habana, 2002.
- [22] BIPM, «Metre Convention,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.bipm.org/en/convention/>. [Último acceso: 13 Noviembre 2013].
- [23] C. López Gil, «Decisiva la metrología en desarrollo socioeconómico cubano,» *Granma*, p. 1, 29 Mayo 2013.
- [24] Portalcalidad, «Portalcalidad,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.portalcalidad.com>. [Último acceso: 7 Noviembre 2013].
- [25] BIPM-OIML, «Resource Center,» 2013. [En línea]. [Último acceso: 30 Noviembre 2013].
- [26] «Sistema Metrológico Internacional - RNM - Red Nacional de Metrología,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.metrologia.cl>. [Último acceso: 13 Noviembre 2013].
- [27] MetÁs & Metrologos Asociados, «Acuerdos de Reconocimiento Mutuo (MRA) en Metrología,» *MetÁs*, nº 12, pp. 2-6, 2009.
- [28] L. Mussio, *El Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del CIPM en el marco de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas*, Santiago de Chile: Diálogo bianual entre las agencias

- regulatorias de América Latina, 2008.
- [29] Portalcalidad, «Portalcalidad-OIML,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.portalcalidad.com>. [Último acceso: 12 Noviembre 2013].
- [30] --, «Servicio de metrología y calibración,» [En línea]. Available: <http://www.gi.ulpgc.es/smc/index.php?pagina=Directorioweb&ver=101.1metrologia>. [Último acceso: 13 Noviembre 2013].
- [31] A. R. Hernández Leonard y Y. Reyes Ponce, «Cincuenta años de aseguramiento metrologico a la economía cubana. Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología.,» *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, vol. 3, p. 12, 2013.
- [32] N. Fernández Rodríguez, «En Cuba, la metrología se abre paso,» *Radio Rebelde*, 2011.
- [33] ONN, *DG01. Instrumentos de medición sujetos a verificación obligatoria y a aprobación de modelo según los campos de aplicación donde serán utilizados.*, La Habana, 2012.
- [34] ONN, *DG09. Disposiciones para la supervisión metrológica.*, 2011.
- [35] N. Fernández Rodríguez, «Destacan relevantes dimensiones de la metrología en la Isla.,» *Semanario económico y financiero de Cuba*, Mayo 2013.
- [36] J. Arántegui, *Control de procesos*, 2011.
- [37] Grupo de Trabajo 1 del Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM / WG 1), *JCGM 100: Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*, 2008.
- [38] M. Botero A., W. Ardila U y L. M. Ospina G., «Proceso de confirmación metrologica dentro de una organización productiva,» *Scientia et Technica*, nº 40, pp. 189-193, 2008.
- [39] MetAs & Metrologos Asociados, «Indicadores de desempeño para la gestión metrologica,» *La Guía MetAs*, nº 01, pp. 1-6, 2009.
- [40] S. Sáez Ruiz y L. Font Ávila, *Incertidumbre de la medición. Teoría y práctica*, L&S Consultores S.A. Maracay Aragua, 2001, p. 43.
- [41] Centro Español de Metrología, *Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. GUM*, 2008.

- [42] BIPM, *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the JCGM 101 “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 1.0 ed., 2008, p. 90.
- [43] Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), *Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones*, 1 ed., España, 1998, p. 22.
- [44] S. Sáez Ruiz y J. L. Cobian Martinez, *Curso de Incertidumbre de las Mediciones*, O. T. d. N. d. V. Clara, Ed., Santa Clara, 1999, p. 34.
- [45] Á. M. Sánchez Pérez, J. de Vicente y E. Prieto Esteban, «Metrología y Enseñanza: Errores, incertidumbres y evaluación de la conformidad,» p. 11, Julio 2012.
- [46] I. Usunariz, «Especificaciones en la instrumentación de medida,» 2000. [En línea]. Available: guemisa.com. [Último acceso: 10 2014].
- [47] A. S.-L. ,. M. S. M. Villeta, «Acotación bilateral para la razón tolerancia incertidumbre basada en el índice ICC,» Asociación Española de Ingeniería Mecánica., España, 2010.
- [48] A. M. Sánchez Pérez, «La metrología y su necesidad,» *e-medida. Revista española de metrología*, nº 1, p. 13, Febrero 2012.
- [49] N. I. Coello Machado y Colectivo de autores, *La incertidumbre de la medición y la problemática Seis Sig- ma. Una meta alcanzable o una solución del futuro*, La Habana, 2006.
- [50] NC- ISO, *1000. Unidades SI y recomendaciones para el empleo de sus múltiplos y submúltiplos y de algunas otras unidades.*, La Habana: ONN, 2007.
- [51] . Á. Zipaquirá Triana y . P. R. Porrás Rueda , *Expresión de la incertidumbre en la calibración de equipos de medición de energía eléctrica*, Colombia., 2009.
- [52] M. Estrems Amestoy, *Apuntes de Tecnología de Fabricación*, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2003, p. 87.
- [53] BIPM, *JCGM 104:2009.Evaluation of measurement data — An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents*, 2009.
- [54] I. Castelazo Sinencio, *Uso de la distribución “t” en la estimación de al incertidumbre de la medición.*, Mexico: CENAM, 2002.

- [55] S. Wolfgang A. y R. Lazos M., *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*, 2004, p. 27.
- [56] M. Grinstead Charles y L. S. J., «9. *Central Limit Theorem*». *Introduction to Probability (PDF)*, 2 ed., AMS Bookstore, 1997, pp. 325-360.
- [57] Miller, R. Irwin, Freund, J. E. y R. Johnson, *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Tomo 1., La Habana: Felix Varela., 2011.
- [58] European co-operation for accreditation, *EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, 1999, p. 90.
- [59] United Kingdom Accreditation Service (UKAS), *M3003. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement JH 2007*, 2007.
- [60] ILAC, *Policy for Uncertainty in Calibration (ILAC P-14)*, Australia: ILAC, 2010.
- [61] ISO, *800001. Quantities and units. Part 1. General. Primera edición*, 2009.
- [62] ONARC., *Política de Trazabilidad*, La Habana, 2013.
- [63] ILAC-OIML, *Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments*, OIML, Ed., 2007, p. 11.
- [64] Colectivo de autores de la Unión Eléctrica, *UT-MP-0003. Trazabilidad e incertidumbre de las mediciones. Revisión 00*, La Habana, 2006.
- [65] D. Peña Sánchez de Rivera, «Fundamentos de Estadística (1ª edición),» Alianza, 2008, p. 688.
- [66] E. Ropero Moriones, *Manual de estadística empresarial (1ª edición)*., Delta Publicaciones. , 2009, p. 200.
- [67] ILAC, *G8:03. Guidelines on the Reporting of Compliance with Specification*, 2009.
- [68] N. ISO, *3534. Estadística - Vocabulario y simbolos- PARTE 1: Términos de probabilidad y estadística general.*, 1999.
- [69] Y. Portuondo Paisan y . J. Portuondo Moret , *La repetibilidad y la reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medición.*, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, 2010.

- [70] ONN, NC 1066. *Guía para la expresión de la incertidumbre*, La Habana, 2015.
- [71] ONN, NC Guía 883. *Guía para la elaboración de normas de métodos y equipos para al verificación de instrumentos de medición*, La Habana, 2012.
- [72] Á. M. Sánchez Pérez, «Laboratorio de metrología y metrotécnica,» 2008. [En línea]. Available: http://www.madrimasd.org/Laboratorios/documentos/Red-Laboratorios/documentos/Incertidumbre_2008.pdf. [Último acceso: 19 05 2015].
- [73] V. M. Aranda, *Estadísticas de desempeño aplicadas en la evaluación de trazabilidad y la adecuación para el propósito*, Mexico: La Guía MetAs, 2015.

Anexo A. Funciones de distribución

La función de distribución, [37], [65], [66] es una función que da para cada valor de x , la probabilidad de que la variable aleatoria X sea menor o igual que x .

$$F(x) = Pr(X \leq x) \tag{A.1}$$

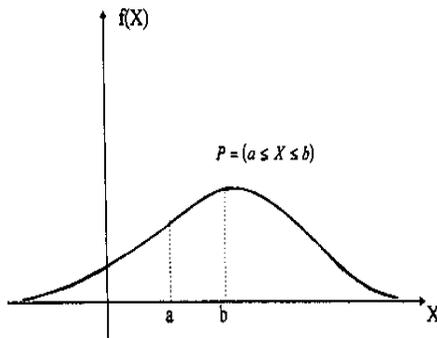
Mientras que la Función de densidad de probabilidad: (para una variable aleatoria continua), es la derivada (cuando existe) de la función de distribución.

$$f(x) = dF(x) / dx \tag{A.2}$$

$f(x)dx$ se denomina “elemento de probabilidad” o “probabilidad elemental”:

$$f(x)dx = Pr(x < X < x + dx) \tag{A.3}$$

La probabilidad de que la variable aleatoria tome valores en el intervalo $[a, b]$ es igual al área bajo la curva acotada por los dos extremos del intervalo, figura A.1. Para determinarla es necesario realizar investigaciones y cálculos muy voluminosos; por eso, este método de descripción se utiliza sólo en casos especiales, por ejemplo, cuando se realizan investigaciones sobre nuevos instrumentos de medida.



$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(X) dX \tag{A.4}$$

Donde $f(X)$: Función de densidad de probabilidad

Figura A.1. Probabilidad de que la variable aleatoria tome valores en el intervalo $[a,b]$.

Para caracterizarlas con un valor numérico se usan las llamadas medidas de tendencia central y de dispersión; las más usadas son: la esperanza matemática, la varianza y la desviación estándar.

La esperanza matemática, [37], [65], [66] también llamada esperanza, valor esperado, media poblacional, media de una variable "X", es el número "E(X)". Para una variable aleatoria continua X, con función de densidad de probabilidad f(x), la esperanza, si existe, es:

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x * f(x) dx \quad (A.5)$$

Donde la integral se extiende a todo el campo de variación de X.

De acuerdo a la definición de esperanza matemática, para determinarla sería necesario contar con información sobre todos los posibles valores que podría tomar la variable aleatoria. En la práctica sólo se cuenta con un número limitado de observaciones y a partir de esta muestra, se necesita estimar el valor de la esperanza matemática de la variable aleatoria. En calidad de estimador matemático se utilizará la media aritmética.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (A.6)$$

La esperanza matemática permite conocer a qué valor tiende la variable aleatoria; sin embargo, dos variables aleatorias pueden tener la misma esperanza matemática, pero una tener mayor dispersión de sus valores respecto a la esperanza matemática que la otra. Esta propiedad se caracteriza por medio la denominada varianza, definida como la esperanza matemática del cuadrado de la variable aleatoria centrada (variable aleatoria cuya esperanza matemática es igual a cero). [37] , [66]

$$\sigma^2 = V(X) = E[X - E(X)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [X - E(X)]^2 f(X) dX \quad (A.7)$$

Siendo la desviación estándar, la raíz cuadrada positiva de la varianza. [37], [66]

$$\sigma(X) = +\sqrt{V(X)} \quad (A.8)$$

Para la desviación estándar de la media sería:

$$\sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.9})$$

Tanto para el cálculo de la varianza como de la desviación estándar se utilizan los estimadores matemáticos $S(X)$ y $S(\bar{X})$, que se calculan como: [37], [65], [66]

$$S(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (\text{A.10})$$

$$S(\bar{X}) = \frac{S(X)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.11})$$

Por lo tanto

$$S(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (\text{A.12})$$

Ley de suma de las varianzas si las variables son independientes. [44] [40]

Todo proceso de medición está representado por un modelo matemático dado por:

$$Y = F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (\text{A.13})$$

$$\sigma_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 * \sigma^2(x_i) \quad (\text{A.14})$$

Ley de propagación de la incertidumbre: [37] Considerando que las magnitudes de entrada son independientes, la incertidumbre estándar combinada se define como la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ y es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $u_c^2(y)$, dada por:

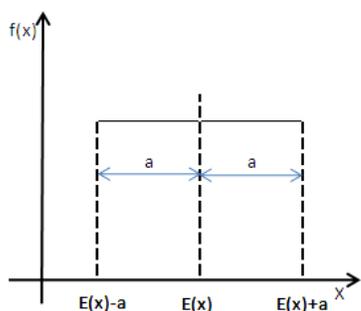
$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 * u^2(x_i) \quad (\text{A.15})$$

Los errores de la medición como variable aleatoria continua básicamente pueden seguir una función de distribución rectangular, triangular o normal, y se caracterizan por:

Distribución rectangular

Cuando únicamente es posible estimar límites (inferior y superior) para X_i , en

particular, para poder decir que “la probabilidad de que el valor de X_i esté comprendido en el intervalo de a^- a a^+ , es a todos los efectos prácticamente igual a uno y la probabilidad de que X_i se encuentre fuera de este intervalo es esencialmente cero”. En estos casos se emplea la función de distribución rectangular, que se muestra en la figura A.2.



$$\sigma(X) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.16})$$

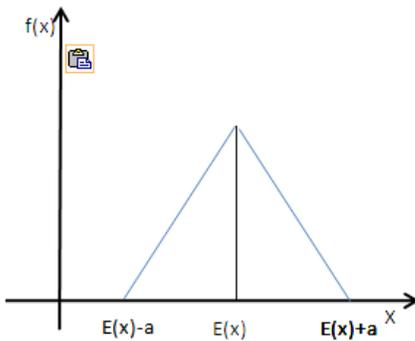
Figura A.2 Función de distribución rectangular

Se utiliza generalmente cuando se analizan componentes individuales de incertidumbres tales como:

1. El error de un instrumento de medida comprendido dentro de los límites del error máximo permisible.
2. La resolución de un instrumento de indicación digital o la apreciación de las lecturas en un instrumento de medida de indicación analógica.
3. La histéresis de las indicaciones de un instrumento de medida.
4. El efecto de algunas magnitudes influyentes.

Distribución triangular

En el caso que la probabilidad de que la variable aleatoria tome valores entre $(-a$ y $+a)$ tenga un valor máximo en el centro del intervalo y disminuya linealmente hacia los extremos del mismo hasta cero, se está en presencia de una función de distribución triangular, tal como se muestra en la figura A.3.

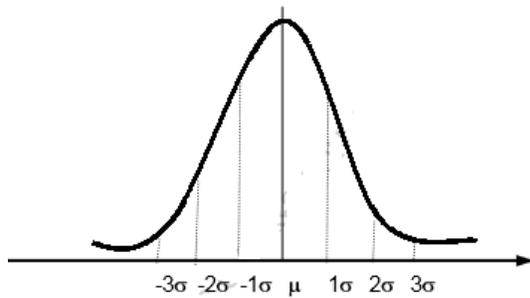


Si el intervalo es simétrico la varianza de la variable aleatoria (X) será:

$$\sigma(X) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (\text{A.17})$$

Figura A.3 Función de distribución triangular

En la estadística matemática tiene gran importancia la denominada "ley de distribución normal o ley de distribución de Gauss" que se muestra en la figura A4. Para una variable que sigue esta ley se cumple que:



$$P(|X| \leq \mu + 3\sigma) = 99,73 \% \quad (\text{A.18})$$

Figura A.4 Función de distribución normal

Esto significa que para una distribución normal, la probabilidad que la variable tome valores fuera del intervalo $\mu + 3\sigma$ es prácticamente cero. Por tanto si los valores observados de una variable están incluidos en el intervalo $\mu + a$ y ella sigue una ley de distribución normal, se puede plantear que $a = 3\sigma$, o sea:

$$\sigma^2(x) = \frac{a^2}{9} \quad (\text{A.19})$$

$$\sigma(x) = \frac{a}{3} \quad (\text{A.20})$$

Anexo B. Acta de calibración para un ciclo

Denominación: _____ No de REGISTRO: _____

Pertenece a: _____

Clasificación: Analógico __ Digital__

Emp: _____

Excluyendo al elemento sensor: Sí __ No__ Con Magnitudes incidentes: Sí __
No__

Valor a simular de las magnitudes incidentes: _____

Apreciación ó resolución con que se hace la medición: _____

Elementos que conforman el sistema:

Denominación	No de serie	Rango	Modelo	Otras características

Indicaciones

% del rango	Valor de entrada (____)	Valor nominal de salida (____)	Asc	Desc

Comprobación de los valores de alarma.

Alarma 1 ()			Alarma 2 ()		
Valor deseado	Asc	Desc	Valor deseado	Asc.	Desc

Comprobación de las protecciones (disparos).

Disparo 1 ()			Disparo 2 ()		
Valor deseado	Asc	Desc	Valor deseado	Asc.	Desc

Condiciones bajo las que se ejecuta la calibración:

Fecha: _____ Temperatura: _____ °C HR: _____ %

Patrones empleados: _____

Nombre de los técnicos: _____

Comprobación de los valores de alarma.

Alarma 1 ()			Alarma 2 ()		
Valor deseado	Asc	Desc	Valor deseado	Asc.	Desc

Comprobación de las protecciones (disparos).

Disparo 1 ()			Disparo 2 ()		
Valor deseado	Asc	Desc	Valor deseado	Asc.	Desc

**Determinación de la característica
dinámica**

% del 80 % valor final	Valor aplicado	Tiempo (s)
0		
10%		
63%		
90%		
100%		

Condiciones bajo las que se ejecuta la calibración:

Fecha: _____ Temperatura: _____ °C HR: _____ %

Patrones empleados: _____

Nombre de los técnicos: _____

Anexo D. Certificado de Calibración



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
EMPRESA TECNOLÓGICA DE LA INFORMACIÓN Y AUTOMÁTICA
ATI Villa Clara

Dirección: Campo No 1 e/ Pr
Santa Clara. Villa Clara.
Teléfono: 291854. Fax 291730

Certificado de calibración No _____ Página ____ de ____
Clasificación del Certificado: Simplificado _____ Con todos los resultados _____
Denominación _____
Elementos que lo conforman _____ No. de serie: _____
Error máximo permitido _____
Cliente: _____
Dirección: _____

Se certifica que el instrumento: _____ Cumple
_____ No Cumple
_____ No es posible declarar cumplimiento ó no cumplimiento

Ha sido calibrado según :

Método de medición empleado:

Patrones utilizados:

Incertidumbre Expandida: $U(e) =$ _____ con $k =$ _____

Dicho valor fue obtenido por la multiplicación de la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura k tal que la probabilidad de cobertura responda aproximadamente al 95 %.

Condiciones de ambientales: $T =$ _____

$HR =$ _____

Calibración realizada en: Lab. Central _____ Inst. temporal _____ In situ _____

Fecha de calibración: _____

Técnicos que realizaron la calibración: _____

Personal que aprueba el Certificado: _____

Firma: _____

J. Laboratorio

Cuño

Cargo

Fecha de emisión

*Este certificado solo ampara a los instrumentos relacionados en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial del presente certificado sin la aprobación escrita del laboratorio.
Los patrones utilizados son trazables a los del Servicio Nacional de Metrología, los cuales mantienen la trazabilidad al Sistema Internacional de Medidas (SI) mediante la calibración periódica o intercomparaciones con patrones nacionales e internacionales.*

Dorso del certificado

Página __-de ____

Elementos que conforman el Sistema o Cadena de medida

Denominación	No de serie	Intervalo de medida	Modelo

Errores de Indicación

V.Nominal Salida	Ascenso	U	k	Distribución	Conformidad
					-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

V.Nominal Salida	Descenso	U	k	Distribución	Conformidad
					-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

HISTÉRESIS + ZONA MUERTA

V.Nominal Salida	Ciclo1	-	-	-	Ciclo 6
		-	-	-	
		-	-	-	

V. Nominal Salida	U	k	Tipo de distribución

Determinación del error de accionamiento de las alarmas

Valor Nominal salida	Error Asc	U Asc	k	Distribución

Valor Nominal salida	Error Desc	U Desc	k	Distribución

Característica dinámica

Notas:

En caso de ser un certificado simplificado la información completa relativa a las calibraciones está a disposición del cliente. El criterio de conformidad respecto al error máximo permitido declarado por el fabricante, cumple lo establecido en el documento ILAC G-8 [67]:

Cumple: Si el resultado de la medida más¹ /menos² la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 % no supera el límite de la especificación.

No Cumple: Si el resultado de la medida menos² /más¹ la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 % no supera el límite de la especificación.

No es posible declarar cumplimiento o no cumplimiento: Si el resultado de la medida más/menos la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 % incluye el límite.

¹ para analizar respecto al límite superior de medición.

² para analizar respecto al límite inferior de medición.

Anexo E. Algoritmo de las hojas de cálculo en Excel.

Abreviaturas utilizadas:

- V_{nsmin} : Valor nominal de salida mínimo.
- V_{nsmax} : Valor nominal de salida máximo.
- V_{nemin} : Valor nominal de entrada mínimo.
- V_{nemax} : Valor nominal de entrada máximo.
- V_{rch} : Valor real chequeado.
- V_{ns} : Valor nominal de salida.
- V_{ch} : valor chequeado.
- V_{Ansi} : Valor nominal de la salida de la de alarma i.
- V_{Anei} : Valor nominal de la salida de la de alarma i.
- E_{Aasci} : Error de accionamiento de la alarma "i" en ascenso.
- E_{Adesci} : Error de accionamiento de la alarma "i" en descenso.
- V_{Pnsi} : Valor nominal de salida "i" de las protecciones.
- V_{Pei} : Valor nominal de entrada "i" de las protecciones.
- I.M: Intervalo de medida.
- CC_i : Corrección en el punto i.
- EMP: error máximo permisible.
- $Easc_i$: error en ascenso en el punto i.
- $Edesc_i$: error en descenso en el punto i.
- $Pasc_i$: promedio de las lecturas en ascenso en el punto i.
- $Pdesc_i$: promedio de las lecturas en descenso en el punto i.
- $HZm_{i,j}$: histéresis más zona muerta del punto "i" en el ciclo "j".
- $Lasc_{i,j}$: lectura en ascenso del punto "i" en el ciclo "j".
- $Ldesc_{i,j}$: lectura en descenso del punto "i" en el ciclo "j".
- $.i_0$: cantidad de alarmas.
- $.i_1$: cantidad de puntos a chequear.

- i_2 : cantidad de protecciones.
- j_0 : cantidad de ciclos.

Datos a introducir en la acción entrada de datos.

Datos generales

- Número del acta de calibración.
- Cliente/dirección.
- Número de elementos que componen el sistema.
 - Denominación.
 - Número de serie.
 - Intervalo de medida.
 - Modelo.
 - Error Máximo Permisible. (EMP).
- Denominación: Se coloca un botón para elegir si es un sistema de medida o una cadena de medida. Y se coloca otro botón para elegir si es de presión o de temperatura.

Datos de los patrones

- Cantidad de patrones utilizados. Mediante una lista desplegable seleccionar entre uno y siete.
- De cada patrón introducir:
 - Denominación. De una lista desplegable elegir: Beamex, termómetro, termoresistencia y termopar.
 - Número de serie.
 - Intervalo de medida.
 - Trabaja con correcciones, si o no (a seleccionar en lista desplegable).
- Si es un sistema de temperatura, definir si se utiliza auxiliar (mediante lista desplegable que contiene: baño, ____). Si se selecciona baño introducir estabilidad y uniformidad.

- Si es una cadena de presión definir si se utiliza módulo externo, mediante lista desplegable que contiene si y no.
- Si es un sistema y se realiza la prueba de introducir los datos del cronómetro a utilizar:
 - Intervalo de medida.
 - Número de serie.
 - Si se trabaja con correcciones (elegir en lista desplegable, si o no).
 - Deriva

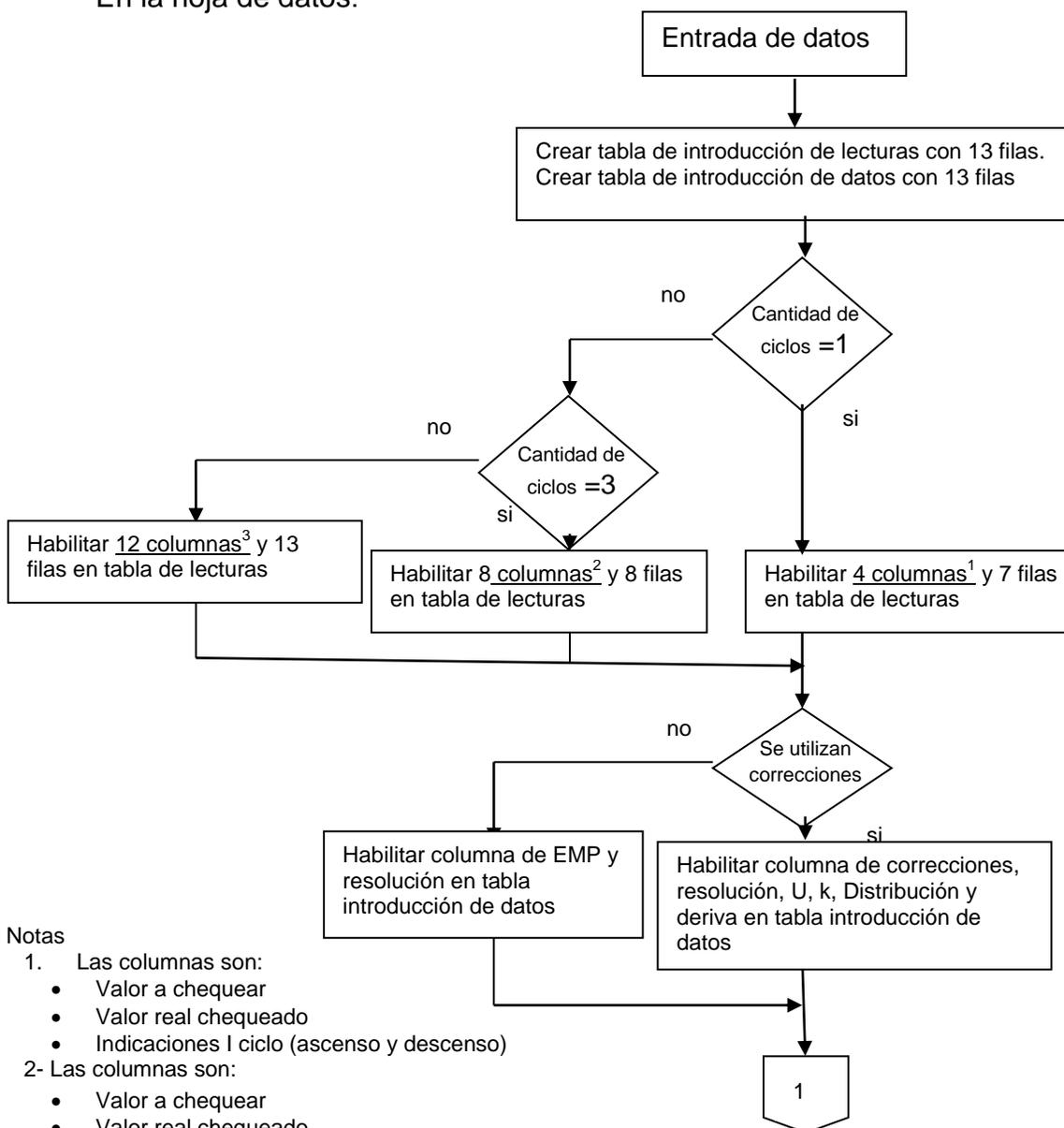
Datos del sistema

- Clasificación. Elegir en lista desplegable entre analógico y digital.
- Con alarmas. Elegir en lista desplegable que contiene si y no.
 - Cantidad de alarmas.
 - Valores.
- Con protecciones. Elegir en lista desplegable que contiene si y no.
 - Cantidad de protecciones.
 - Valores.
- Valor de divisiones en la indicación si es analógico o resolución si es digital.
- Si es analógico introducir "n".
- Valor mínimo nominal de salida.
- Valor máximo nominal de salida.
- Error máximo permisible: Lista desplegable que elige entre la formulas siguientes:
 - *% del rango*
 - *% del rango + k dígitos*
- Si se elige la segunda se habilita una casilla para introducir el valor de "k".
- Si es una cadena introducir:
 - Valor mínimo nominal de entrada.
 - Valor máximo nominal de entrada.

Datos de la calibración

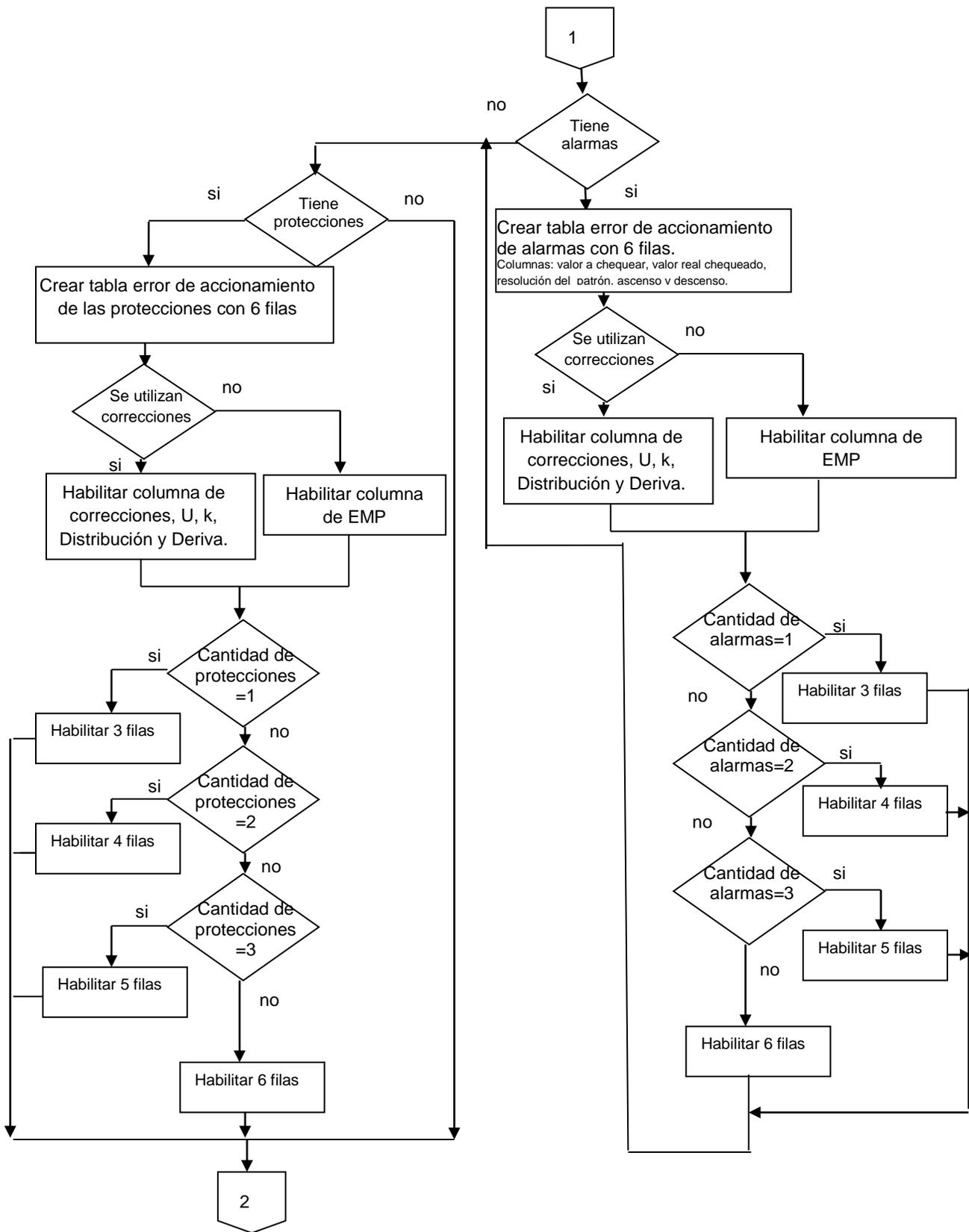
- Calibrado en, mediante lista desplegable elegir entre el laboratorio o in situ.
- Calibrado conforme a: introducir el código de la instrucción de calibración.
- Cantidad de ciclos, mediante lista desplegable elegir entre 1,3 y 5.
- Humedad.
- Temperatura
- Incertidumbre expandida con una probabilidad de:
- Calibrado por:
- Aprobado por:
- Cargo
- Fecha de emisión.

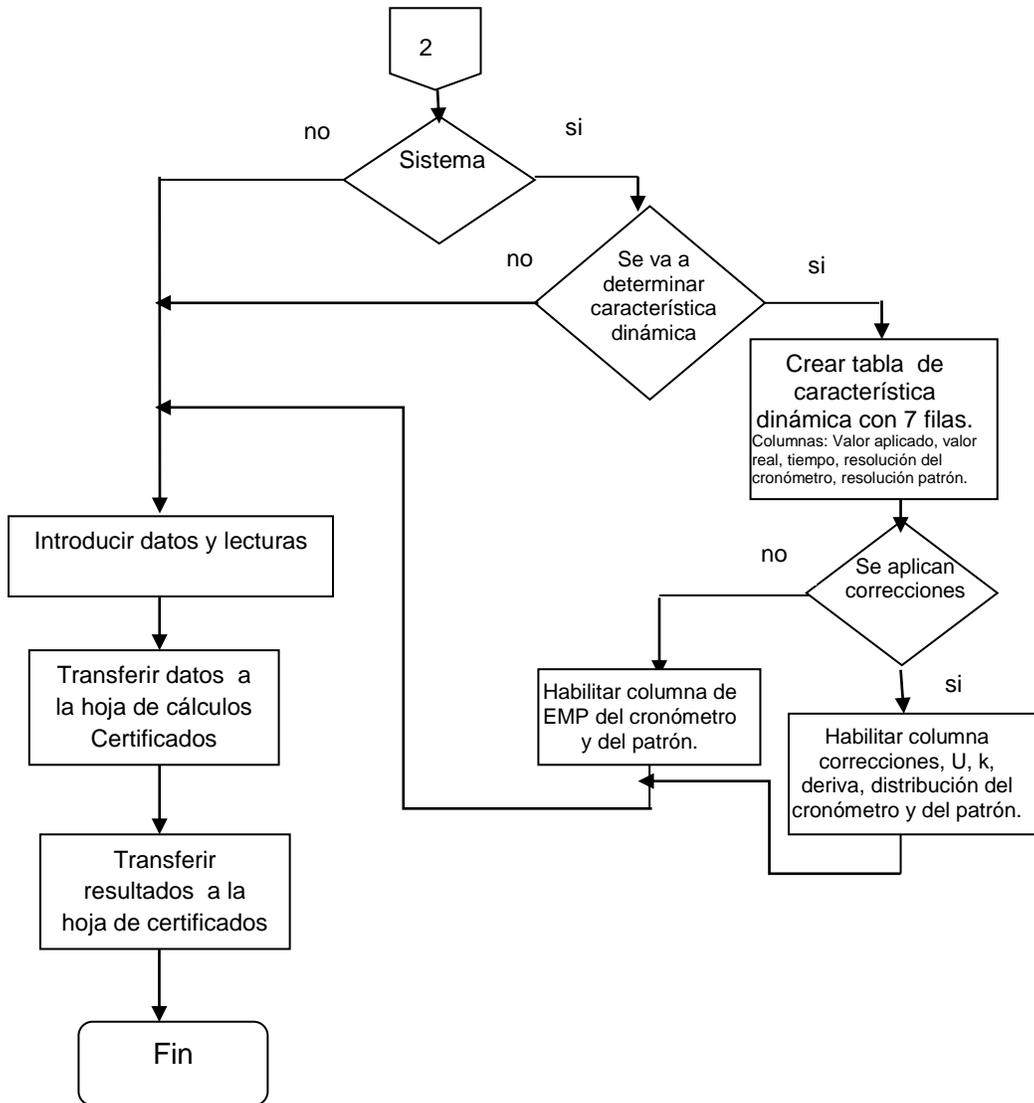
En la hoja de datos:



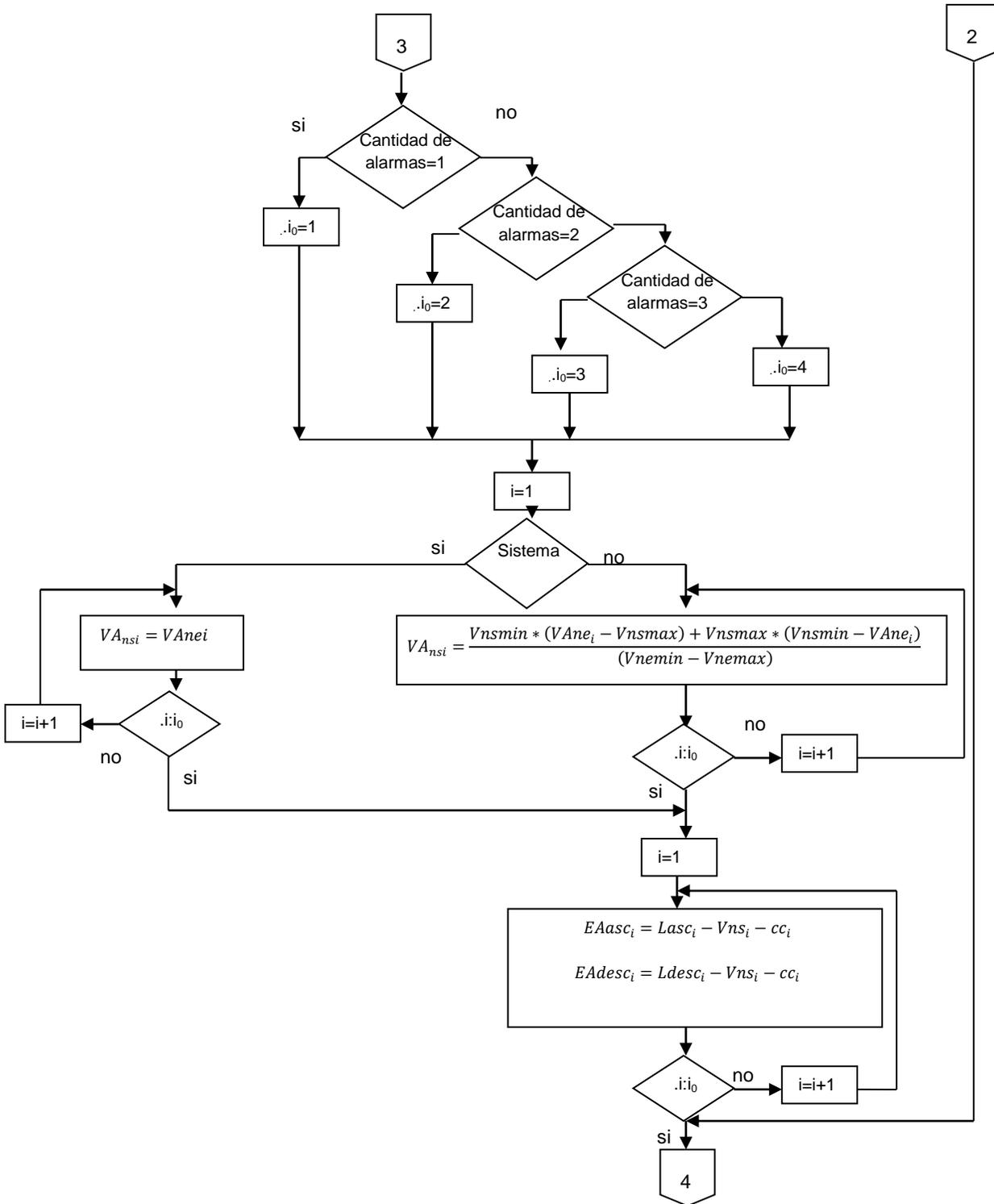
Notas

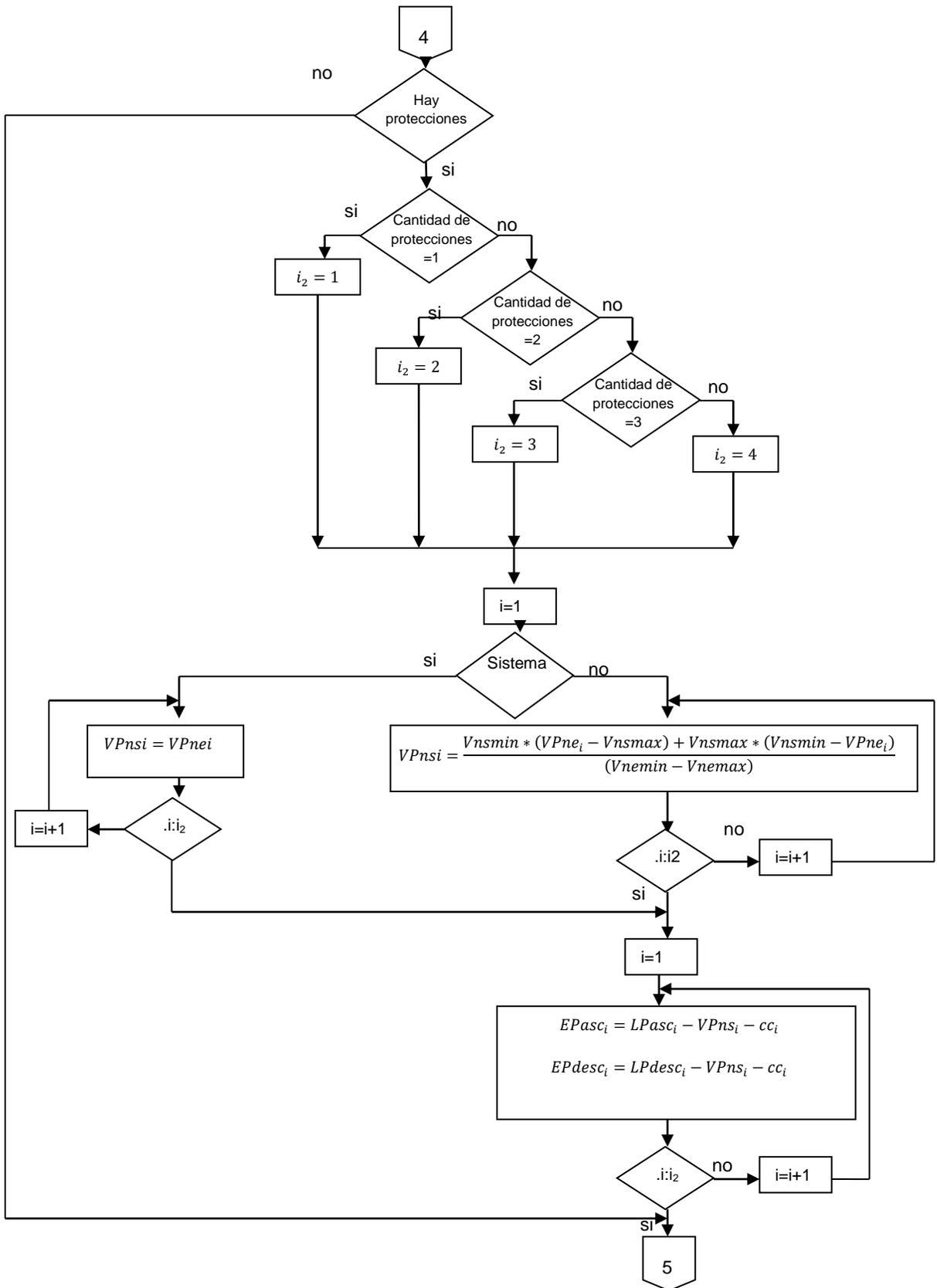
1. Las columnas son:
 - Valor a chequear
 - Valor real chequeado
 - Indicaciones I ciclo (ascenso y descenso)
- 2- Las columnas son:
 - Valor a chequear
 - Valor real chequeado
 - Indicaciones I ciclo (ascenso y descenso)
 - Indicaciones II ciclo (ascenso y descenso)
 - Indicaciones III ciclo (ascenso y descenso)
- 3- Las columnas son:
 - Valor a chequear
 - Valor real chequeado
 - Indicaciones I ciclo (ascenso y descenso)
 - Indicaciones II ciclo (ascenso y descenso)
 - Indicaciones III ciclo (ascenso y descenso)
 - Indicaciones IV ciclo (ascenso y descenso)
 - Indicaciones V ciclo (ascenso y descenso)





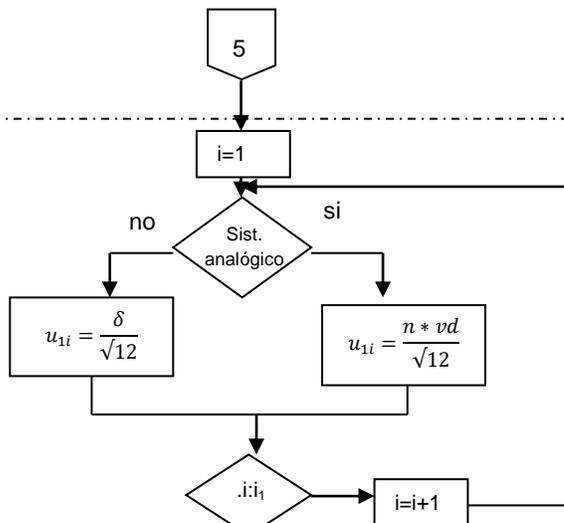
Determinación del error de accionamiento de las alarmas y las protecciones.



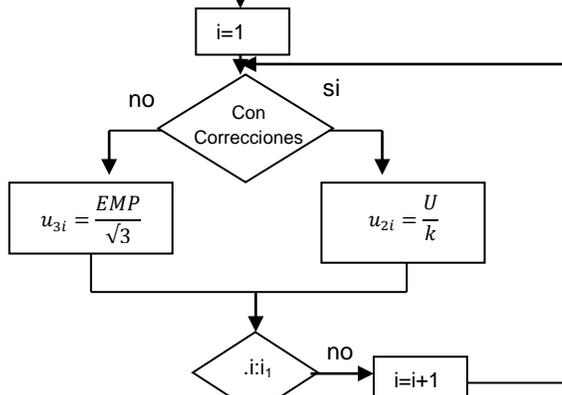


Determinación de la Incertidumbre expandida del error. Se determina para el error en ascenso, error en descenso, error de zona muerta, error de accionamiento de las alarmas y los disparos.

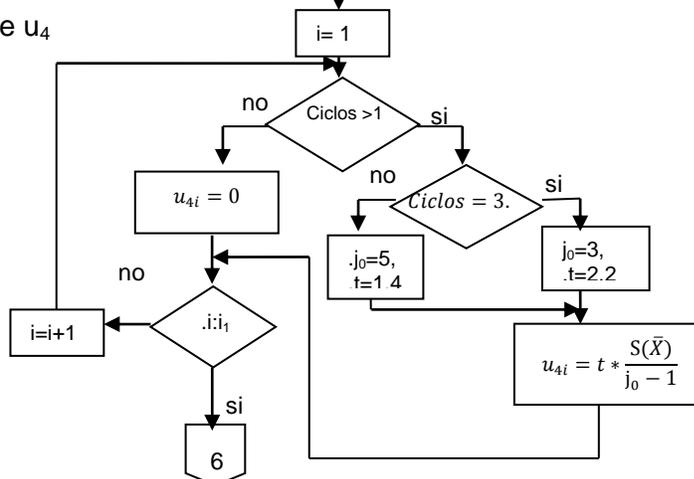
Determinación de u_1



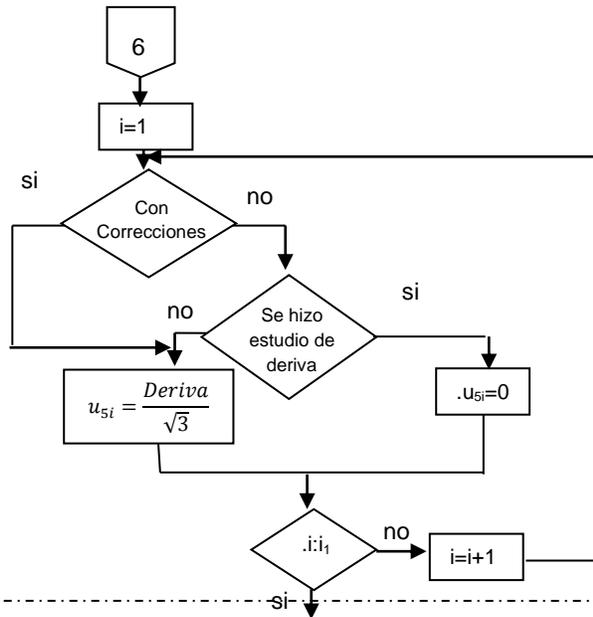
Determinación de u_2 y u_3



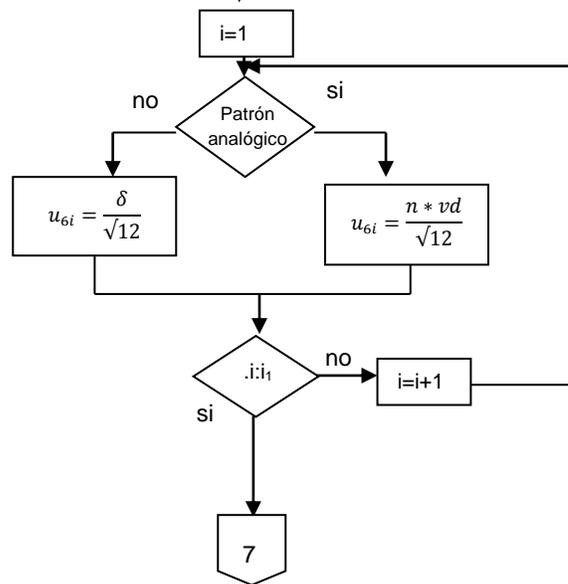
Determinación de u_4



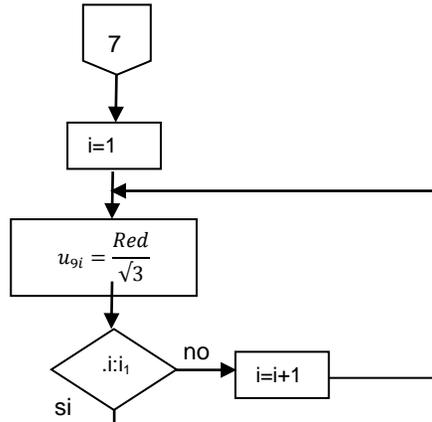
Determinación de u_5



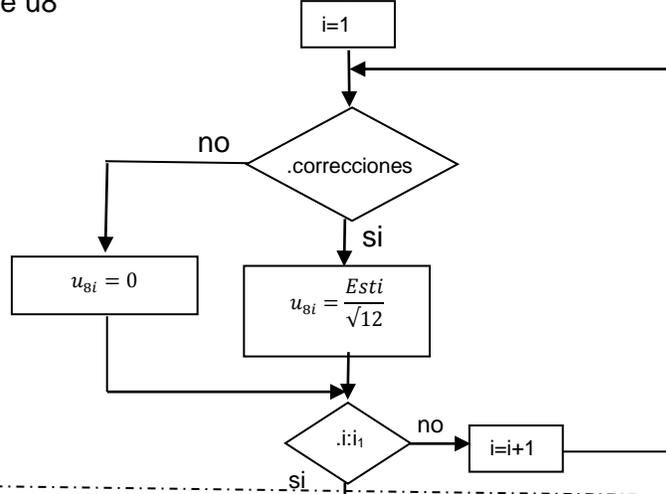
Determinación de u_6



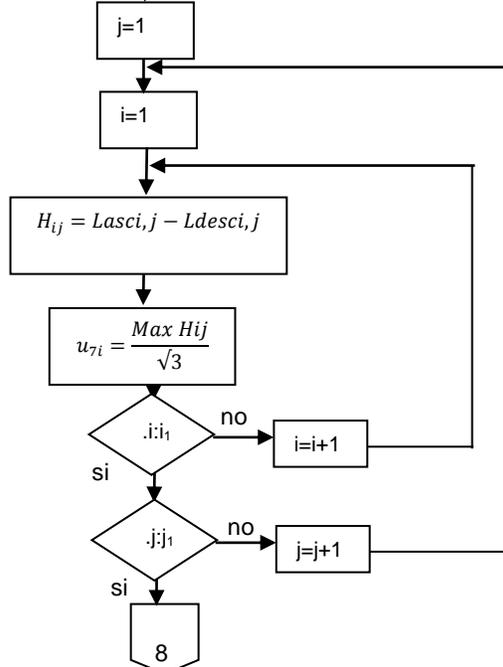
Determinación de u9



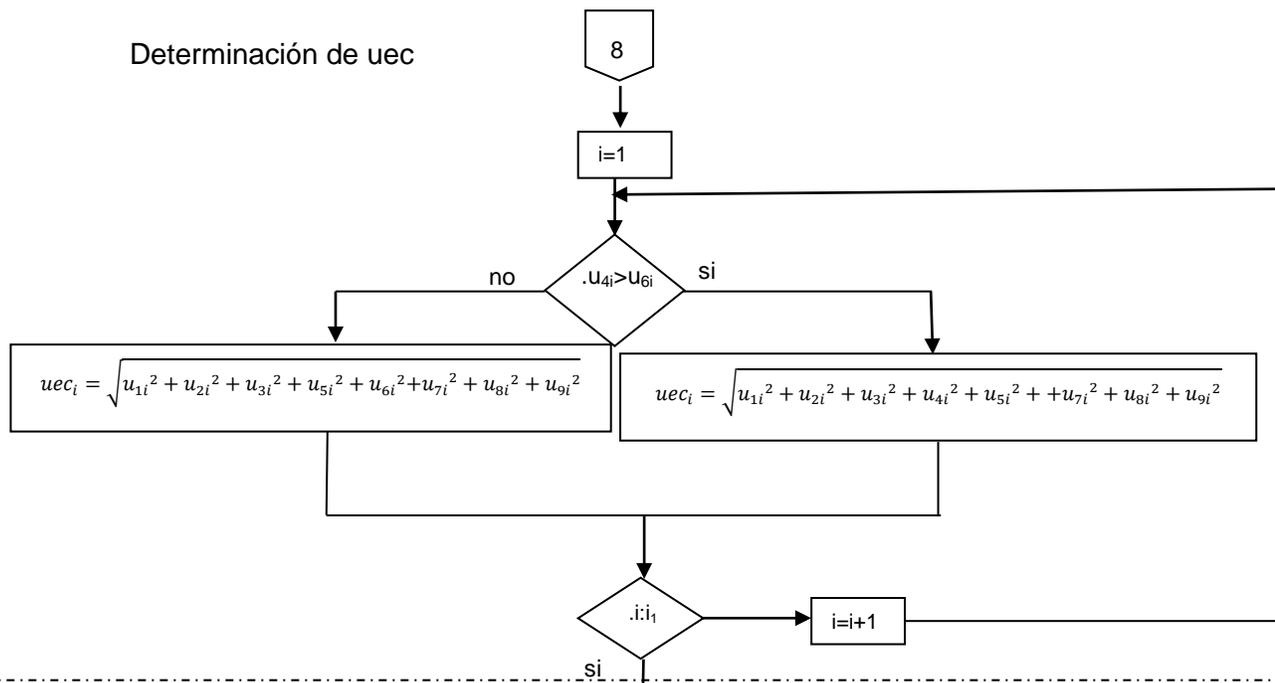
Determinación de u8



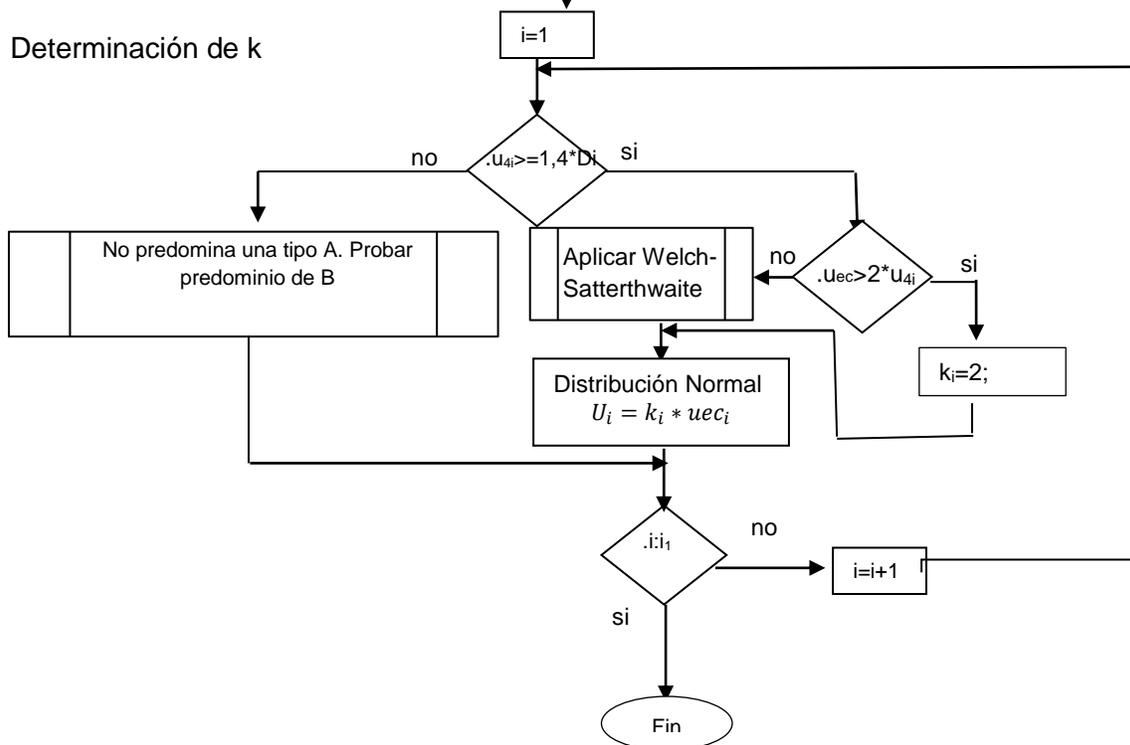
Determinación de u7



Determinación de uec

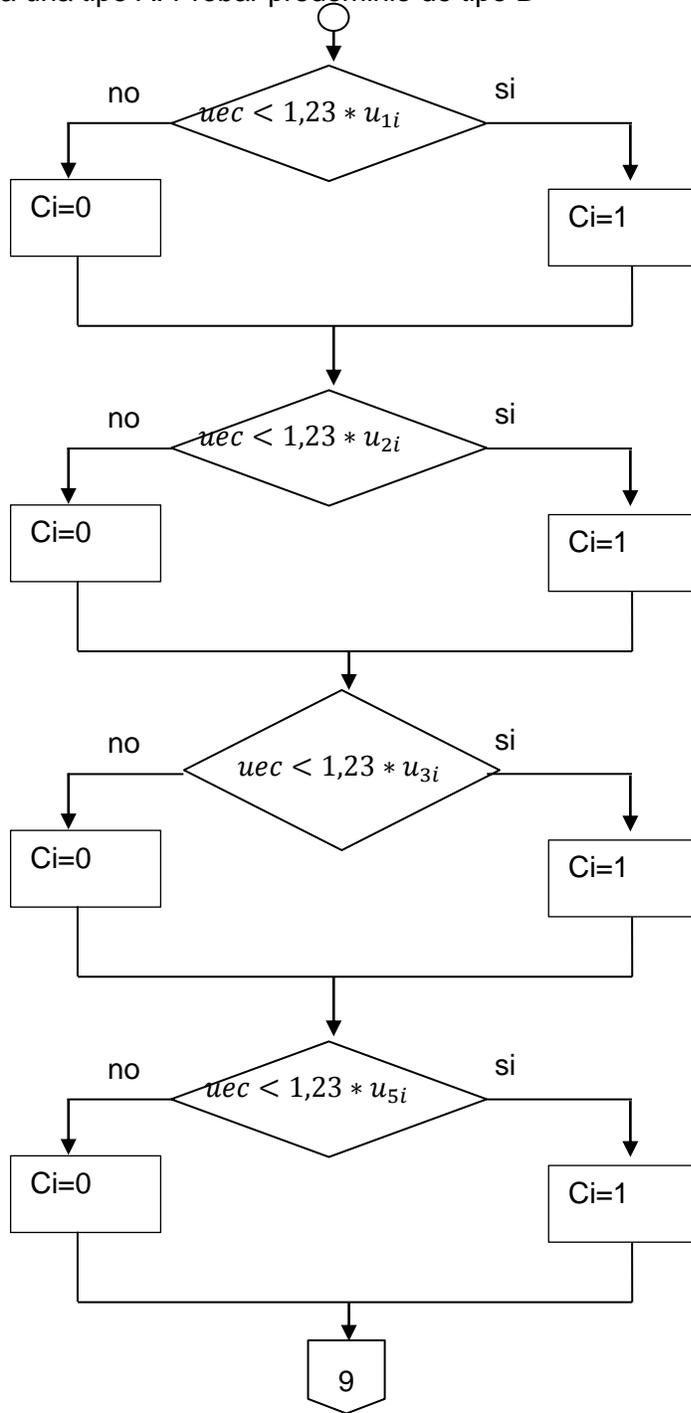


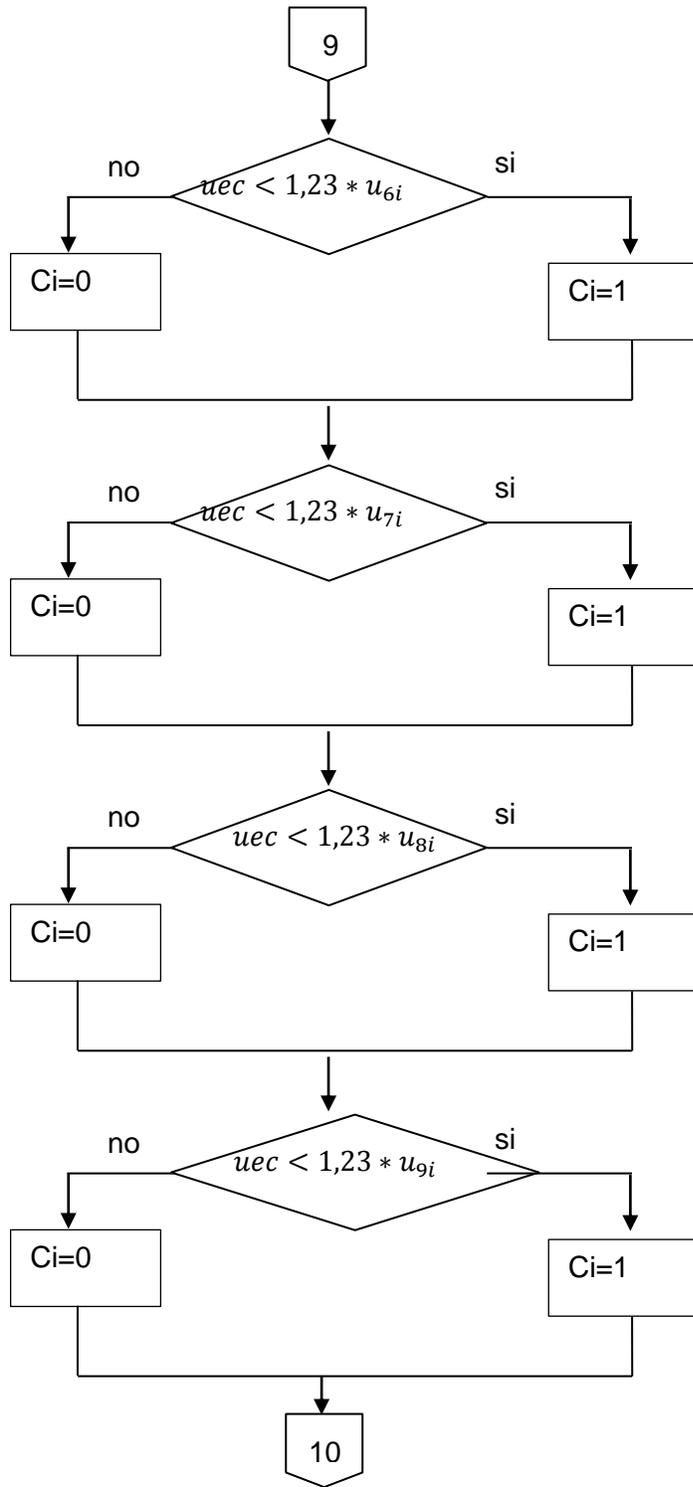
Determinación de k

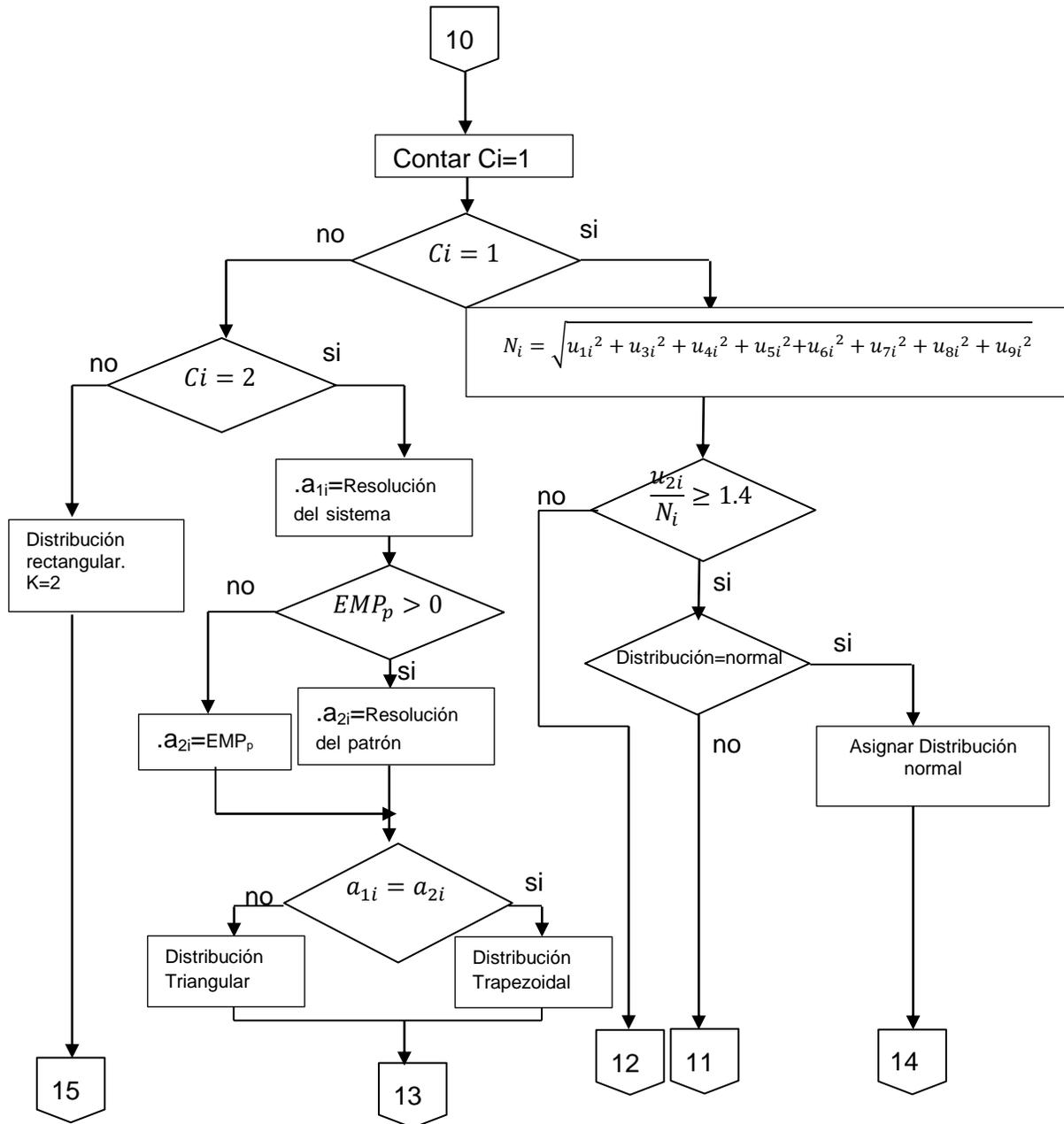


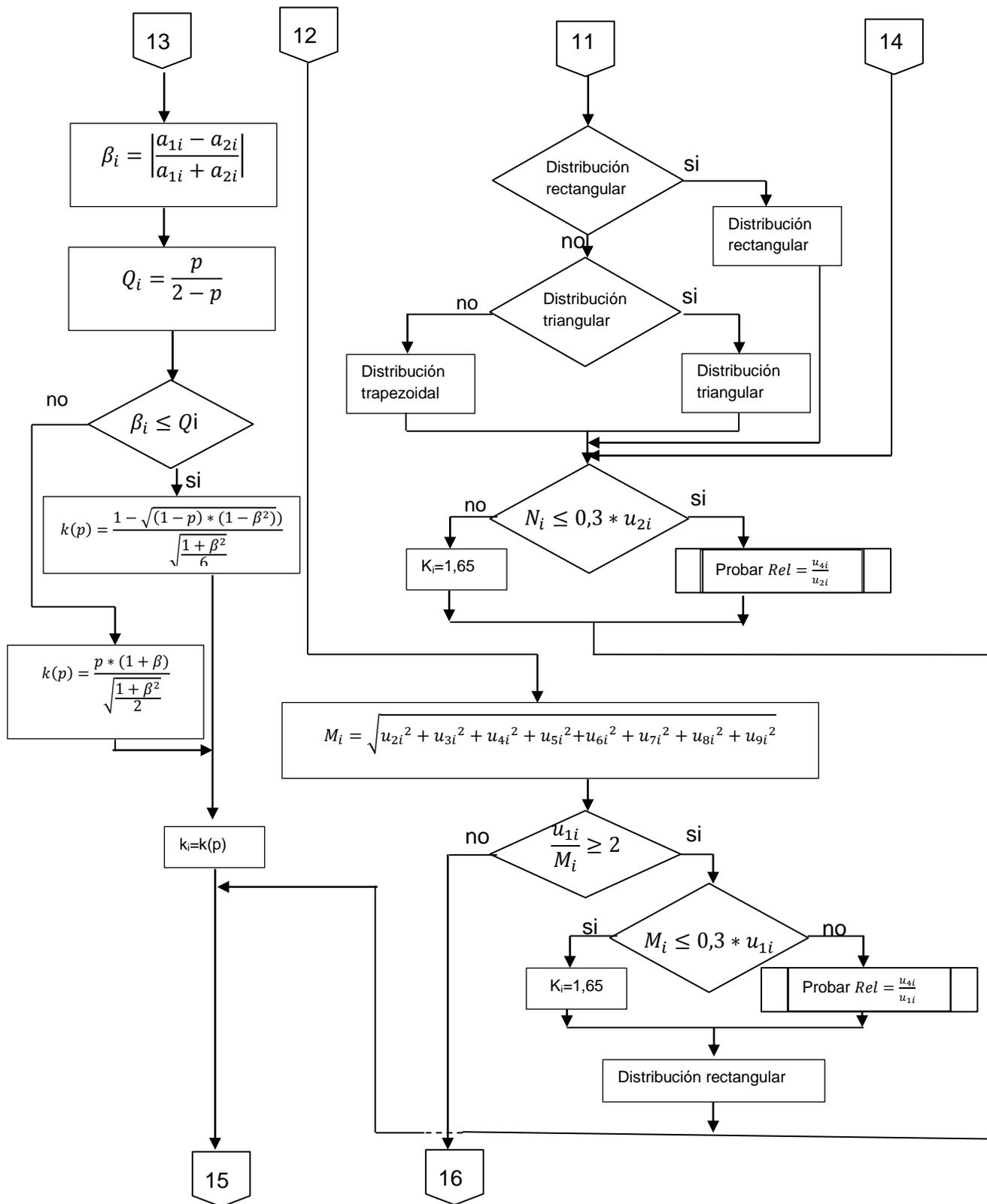
$$D_i = \sqrt{u_{1i}^2 + u_{2i}^2 + u_{3i}^2 + u_{5i}^2 + u_{6i}^2 + u_{7i}^2 + u_{8i}^2 + u_{9i}^2}$$

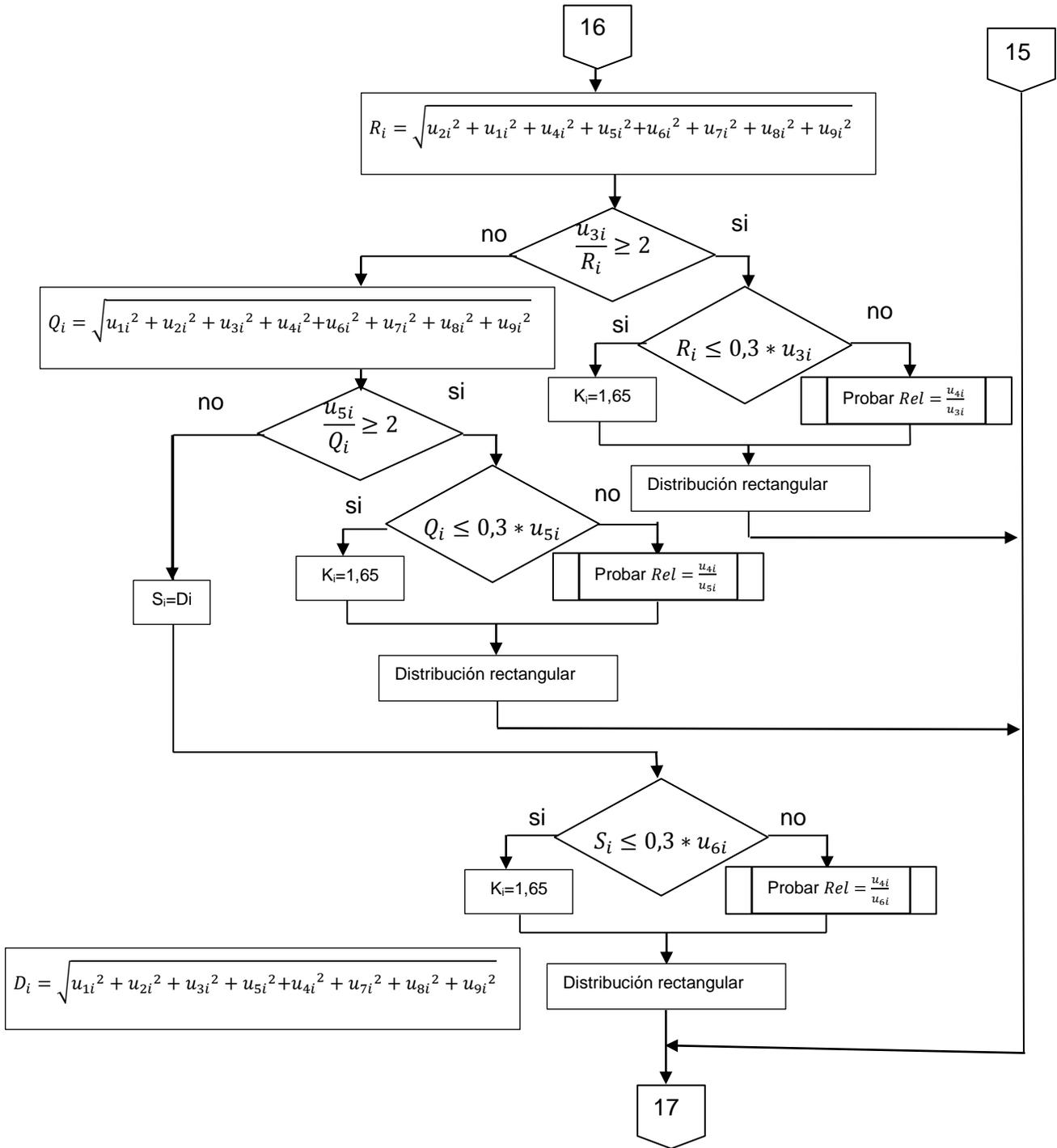
No predomina una tipo A. Probar predominio de tipo B

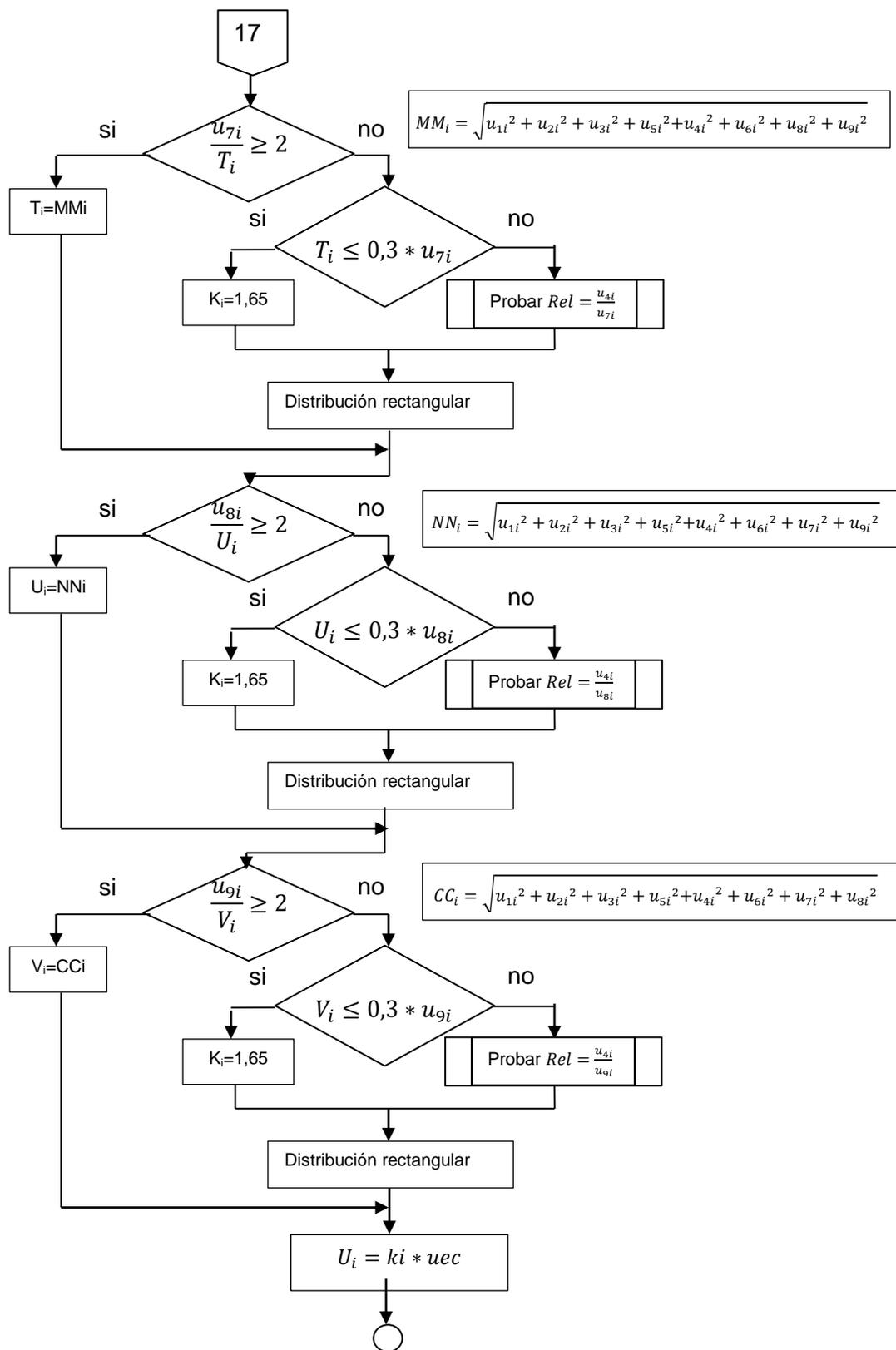




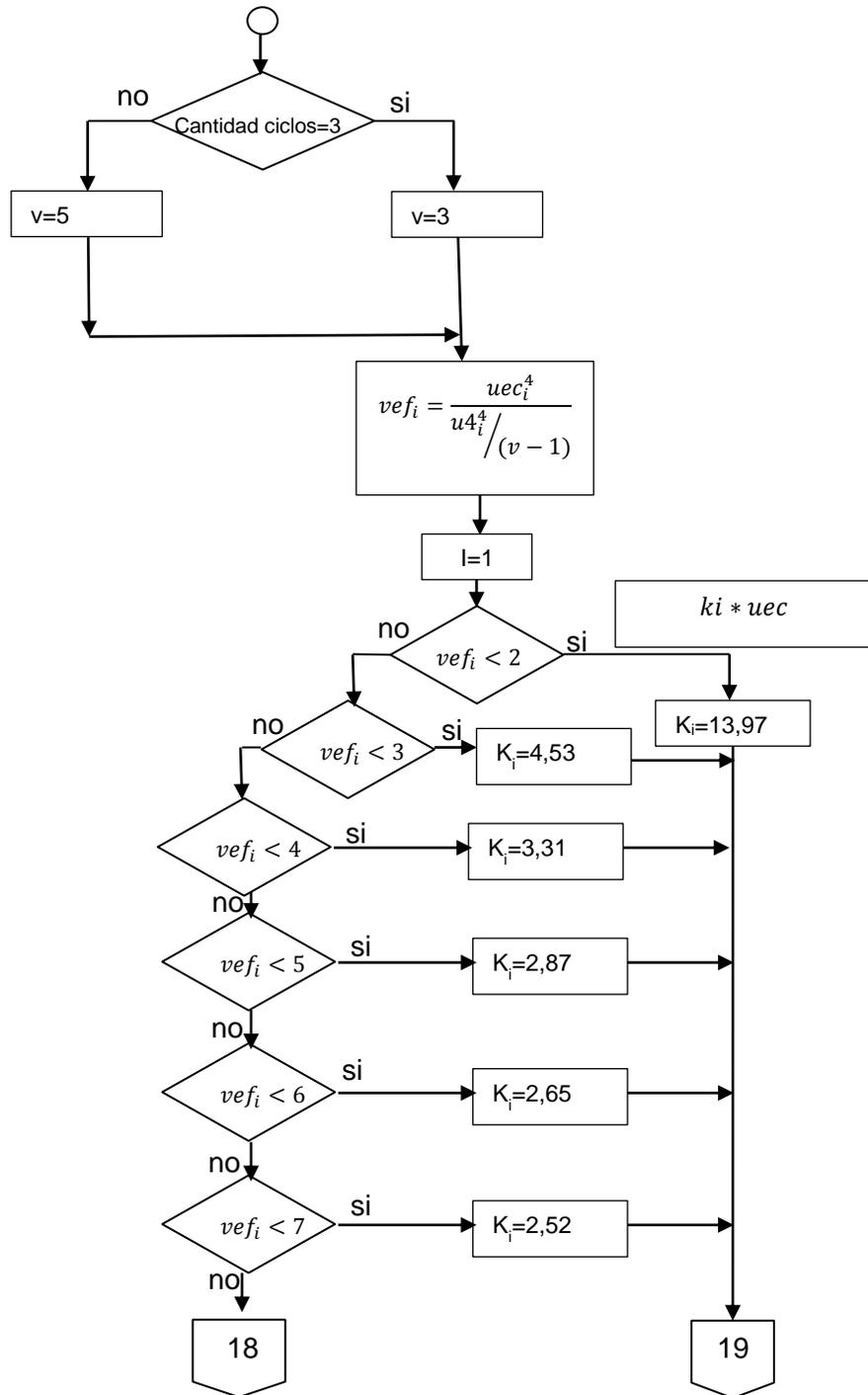


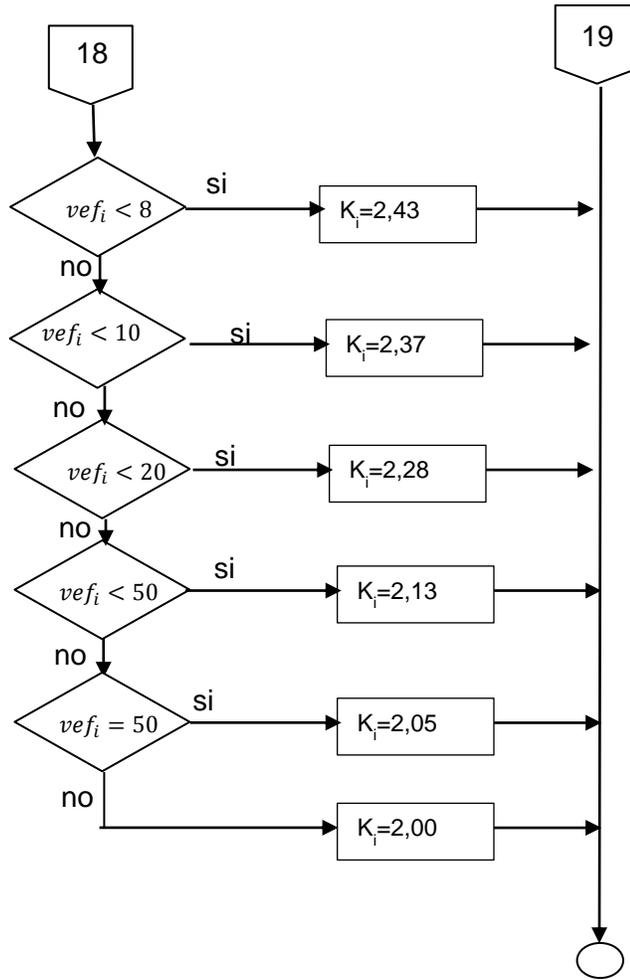




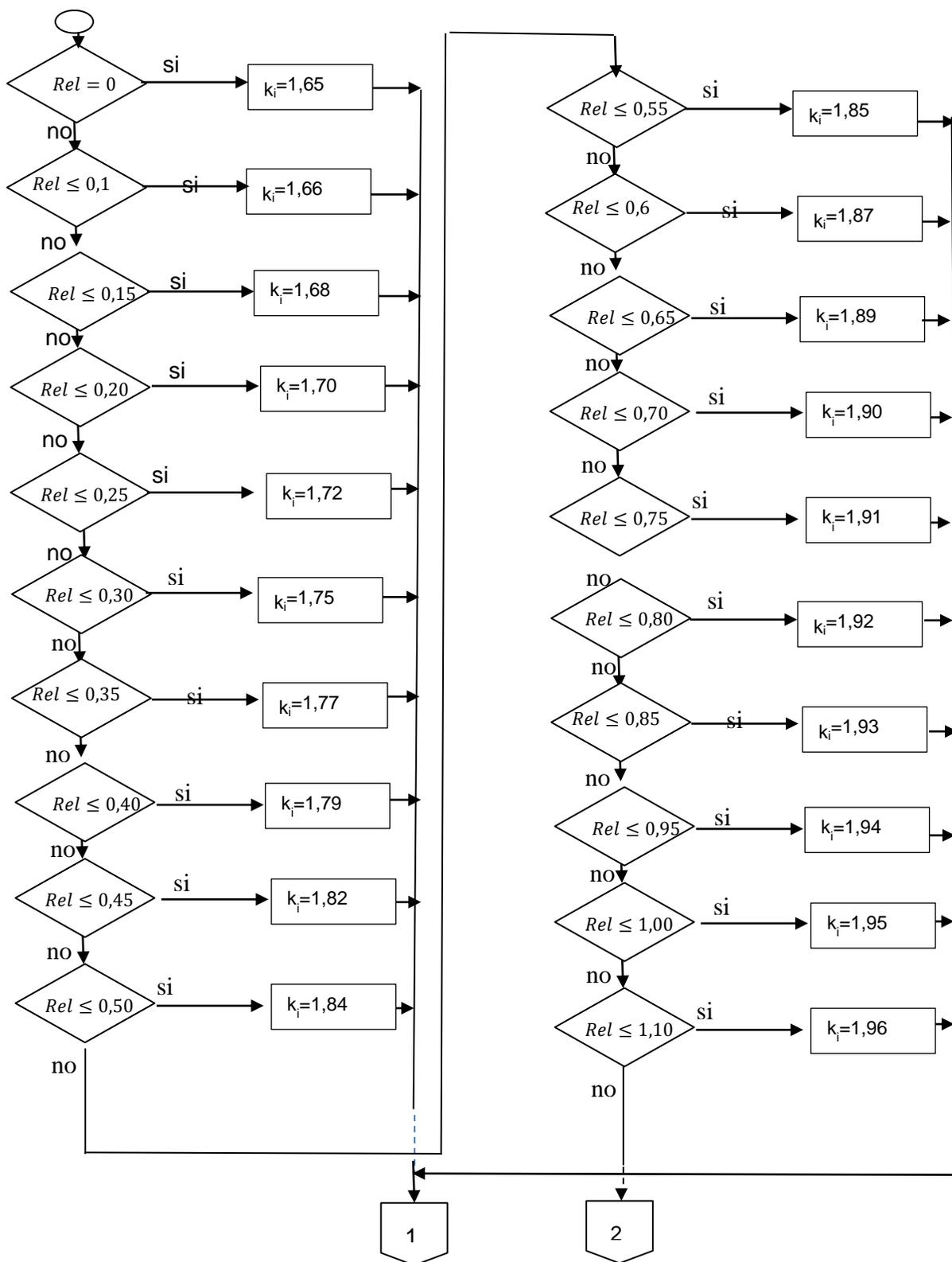


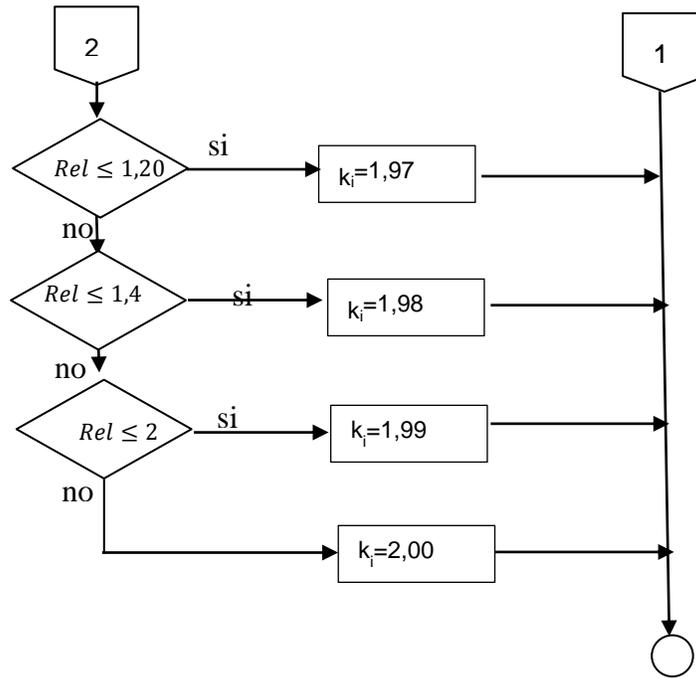
Aplicar Welch-Satterthwaite





Probar Rel





Anexo F. Ejemplo de salida del procesamiento utilizando la herramienta informática diseñada.

	LABORATORIO DE CALIBRACIÓN Empresa de Tecnología de la Información y la Automática. UEB ATI Villa Clara		 Reg. No. 064
	Dirección: Calle Campo No 1 e/ Prolongación de Independencia y Carretera Central Santa Clara, Villa Clara. Teléfono: 291854. Fax 291730		
Certificado de calibración No. <u>1</u>		Página 1 de <u> </u>	
Clasificación del certificado		Simplificado <u> </u> Con todos los resultados <u> </u>	
Denominación:		<u>Sistema de medida de Presión en el motor</u>	
Elementos que lo conforman		<u>Ver al dorso</u>	
Error máximo permitido:			
Cliente:		<u>CEF Cayo Santa María.</u>	
Dirección:		<u>Cayo Santa María, Villa Clara</u>	
Se certifica que el instrumento:		<input type="checkbox"/> Cumple	
Ver al dorso		<input type="checkbox"/> No Cumple	
		<input type="checkbox"/> No es posible declarar cumplimiento ó no cumplimiento	
Ha sido calibrado según:		<u>Y-ITL03-01</u>	
Método de medición empleado:		<u>Comparación directa</u>	
Patrones utilizados:		<u>BEAMEX Serie 11701 Cronómetro 2515</u>	
Incertidumbre Expandida: U (e) =		<u>Ver al dorso con k= Ver al dorso</u>	
Dicho valor fue obtenido por la multiplicación de la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura k, tal que la probabilidad de cobertura responda a aproximadamente el 95 %.			
Condiciones de ambientales: T= <u>23</u> °C HR = <u>65</u> %			
Calibración realizada en: Laboratorio Central <input type="checkbox"/> Instalación temporal <input type="checkbox"/> In situ <input checked="" type="checkbox"/>			
Fecha de calibración: <u> </u>			
Técnicos que realizaron la calibración		Rafael Bartumeu Fidel Alberdi	
Personal que aprueba el certificado		Tania García Rodríguez	
J. Laboratorio Cargo		Firma Cuño	
Fecha de emisión			
Este certificado solo ampara a los instrumentos recalibrados en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial del presente certificado sin la aprobación escrita del laboratorio. Los patrones utilizados son trazables a los del Servicio Nacional de Metrología, los cuales mantienen la trazabilidad al Sistema Internacional de Medidas (SI) mediante la calibración periódica o intercomparaciones			

Denominación	No de serie	Intervalo de medida	Modelo	EMP
Transmisor	Ip41 M1	de 0 bar a 16 bar (E)	Komeco	bar
		de 4 mA a 20 mA (S)		0,2
Convertidor	6043278	de 4 mA a 20 mA (E)	Sconic	bar
		de 4 mA a 20 mA (S)		0,2
Multímonitor	K008-05-221	de 4 mA a 20 mA	DMC-10T	bar
		De 0 bar a 16 bar		0,2
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Errores de Indicación

V.Real Salida	Ascenso	U	K	Distribucion	Conformidad
bar	bar	bar			
0,0	0,00	4,9E-03	1,85	Rectangular	Cumple
8,0	0,01	2,2E-02	2,00	Normal	Cumple
16,0	0,02	4,4E-02	2,00	Normal	Cumple
24,0	0,03	1,0E-01	2,52	Normal	Cumple
32,0	0,02	7,1E-02	2,43	Normal	Cumple
40,0	0,00	1,7E-02	1,85	Rectangular	Cumple
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

V.Real Salida	Descenso	U	K	Distribucion	Conformidad
bar	bar	bar			
0,00	0,00	4,9E-03	1,85	Rectangular	Cumple
8,00	0,00	2,2E-02	2,00	Normal	Cumple
16,00	0,01	3,6E-02	2,00	Normal	Cumple
24,00	0,02	7,0E-02	2,37	Normal	Cumple
32,00	0,02	4,6E-02	2,00	Normal	Cumple
40,00	0,00	1,7E-02	1,85	Rectangular	Cumple
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

HISTERESIS + ZONA MUERTA

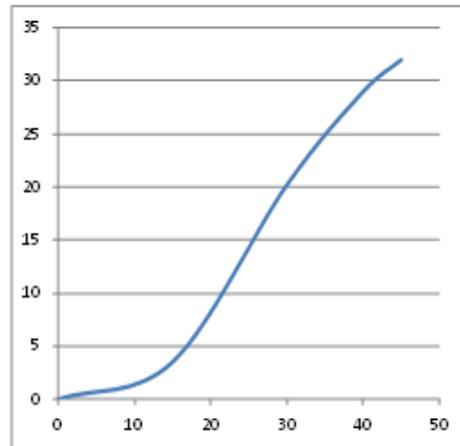
V.Real Salida bar	Ciclo 1 bar	Ciclo 2 bar	Ciclo 3 bar	- bar	- bar
0.00	0	0	0	-	-
8.00	0.01	0	0.01	-	-
16.00	0.02	0.01	0.02	-	-
24.00	0.02	0.01	0.03	-	-
32.00	0.01	0.01	0.02	-	-
40.00	0	0	0	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
0.075	%				

V.Real Salida bar	U bar	k	Distribución
0.00	2.1E-02	1.9E+00	TRIANGULAR
8.00	3.0E-02	1.9E+00	TRIANGULAR
16.00	5.5E-02	1.9E+00	TRIANGULAR
24.00	9.7E-02	1.9E+00	TRIANGULAR
32.00	7.0E-02	1.9E+00	TRIANGULAR
40.00	2.8E-02	1.9E+00	TRIANGULAR
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-

Determinación del error de accionamiento de las alarmas

Valor Real salida bar	Error Asc bar	Error Desc bar	U bar	K	Distribución
19.90	0.01	0.01	1.8E-02	2.00	Rectangular
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

Característica dinámica



Valor real aplicado	Tiempo (s)	uc Valor aplicado	uc del tiempo
0	0	7.22E-03	5.78E-02
3.5	15	7.22E-03	5.78E-02
20.2	30	8.68E-03	5.78E-02
29	40	4.33E-02	5.78E-02
32	45	4.33E-02	5.78E-02

Notas:

El criterio de conformidad respecto al error máximo permitido declarado por el fabricante, cumple lo establecido en el documento ILAC G-8

Cumple: Si el resultado de la medida más (1)/menos (2) la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 % no supera el límite de la especificación.

No Cumple: Si el resultado de la medida menos(2) /más (1) la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 % no supera el límite de la especificación.

No es posible declarar cumplimiento o no cumplimiento: Si el resultado de la medida más/menos la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 % incluye el límite.

(1) para analizar respecto al límite superior de medición.

(2) para analizar respecto al límite inferior de medición.