

ÍNDICES PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO METROLÓGICO BASADO EN RIESGOS EN EMPRESAS DEL SECTOR DE LA ENERGÍA

INDEXES TO EVALUATE RISK BASED METROLOGICAL PERFORMANCE IN COMPANIES IN THE ENERGY SECTOR

Aníbal Barrera García

Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos
Cienfuegos, Provincia de Cienfuegos, Cuba
abarrera@ucf.edu.cu

Michael Feitó Cespón

Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos
Cienfuegos, Provincia de Cienfuegos, Cuba
mfeito@ucf.edu.cu

Roberto Cespón Castro

Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central de Las Villas
Santa Clara, Provincia de Villa Clara, Cuba
rcespon@ucf.edu.cu

Fecha de recepción: 12/03/2021 - Fecha de aprobación: 30/03/2021

DOI: <https://doi.org/10.36995/j.visiondefuturo.2021.26.01.002.es>

RESUMEN

La evaluación del desempeño metrológico es una herramienta que permite la retroalimentación en la gestión de las mediciones y el seguimiento de los resultados alcanzados por las organizaciones que la aplican. En muchas empresas este tipo de evaluación no muestra resultados relevantes, principalmente por las limitaciones en los procedimientos e indicadores empleados para su realización.

El objetivo de este trabajo fue elaborar índices de riesgo metrológico para la evaluación del desempeño metrológico en empresas del sector de la energía. Para el desarrollo de la investigación se seleccionan tres organizaciones pertenecientes a dicho sector. A partir de la utilización en las organizaciones del enfoque de riesgo y de entrevistas, revisión de documentos, tormenta de ideas y métodos estadísticos matemáticos, se definen el índice de riesgo metrológico y el índice de riesgo en la gestión metrológica para empresas del sector mencionado. Los resultados alcanzados demostraron que es posible crear este prototipo de herramienta, así como su utilidad para retroalimentar la gestión de las mediciones, además de orientar el proceso de toma de decisiones gerenciales en materia metrológica.

PALABRAS CLAVE: Desempeño Metrológico; Índice; Riesgo; Mediciones; Energía.

ABSTRACT

The metrological performance evaluation is a tool that allows feedback in the management of measurements and the monitoring of the results achieved by the



organizations that apply it. In many companies this type of evaluation does not show relevant results, mainly due to limitations in the procedures and indicators used to carry it out.

The objective of this work was to develop metrological risk indices for the evaluation of metrological performance in companies in the energy sector. For the development of the research, three organizations belonging to said sector are selected. From the use in the organizations of the risk approach and interviews, document review, brainstorming and mathematical statistical methods, the metrological risk index and the risk index in metrological management are defined for companies in the aforementioned sector. The results achieved showed that it is possible to create this prototype tool, as well as its usefulness to provide feedback on the management of measurements, in addition to guiding the management decision-making process in metrological matters.

KEY WORDS: Metrological Performance; Index; Risk; Measurements; Energy.

INTRODUCCIÓN

Es conocido el papel de las mediciones en cualquier proceso productivo o de servicios, en el comercio interior y exterior, en el control de inventarios y en la toma de decisiones trascendentales para la vida económica y social de un país. De aquí la importancia de garantizar la exactitud de los instrumentos y los sistemas de medición, y sobre todo, de que los resultados de las mediciones, expresados en las unidades de medida del Sistema Internacional de Unidades, sean confiables, seguros, exactos y comparables (Hernández y Reyes, 2013).

Oramas (2014) expresa que la metrología tiene como meta ideal obtener un 100% de exactitud, aunque en la práctica esto sea casi imposible de alcanzar. Sin embargo, toda la actividad de la ciencia metroológica gira alrededor de ese ideal, de esa meta, estudiando, estableciendo y suministrando procedimientos, herramientas y mecanismos que nos ayudan a alcanzar esa máxima exactitud.

Llamosa, Milton y Villareal (2011) explican que el papel de la metrología se hace relevante cuando el proceso de medición es vital en algún tipo de transacción comercial, en aplicaciones militares, en el campo de la salud, en la producción de medicinas o de alimentos; en la realización de pruebas para construcciones de ingeniería civil, de diagnósticos para descubrir la causa de algún problema eléctrico, de trabajos destinados al alcance del uso racional de la energía; en el monitoreo rutinario de los sistemas electromecánicos, mecánicos y electrónicos, en la verificación de límites de contaminantes del ambiente o valores de niveles de radiación, en el monitoreo permanente de las diversas

magnitudes físicas que intervienen en los procesos de producción, y muy especialmente, en la realización de pruebas de calidad.

Se evidencia que la metrología está presente, prácticamente, en todas las actividades de la vida, de aquí que su impacto, cuando esta se realiza de manera confiable, comparable y segura, tenga una repercusión directa en el desarrollo económico, político y social de un país; tan es así que en diversas situaciones se tiende a medir el desarrollo de estos a partir del desarrollo que tengan en la metrología (Reyes, Álvarez y Hernández, 2011).

Por la importancia y el papel que desempeña la metrología en el entorno empresarial se emite en el 2003 la norma ISO 10012 “Sistema de Gestión de las Mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición”. Esta norma contiene requisitos para implementar un sistema de gestión de las mediciones, basado en el ciclo de mejora continua y un enfoque a procesos, lo que favorece su integración en el sistema de gestión global de las organizaciones para alcanzar los objetivos de la calidad del producto, así como para gestionar el riesgo de obtener resultados de mediciones incorrectas.

Dentro del sistema de gestión de las mediciones se encuentra la evaluación del desempeño metrológico, definiéndose como un procedimiento de valoración estructurado, sistemático y periódico de estimación cualitativa y cuantitativa, que permite determinar la capacidad del proceso metrológico para gestionar adecuadamente sus recursos en concordancia con los objetivos y metas establecidas, lo que coincide con López et al., (2021).

Sotelo, Sosa y Carreón (2020) manifiestan que durante este tipo de evaluación se deben analizar los resultados del proceso en un lapso de tiempo determinado mediante indicadores, instrumentos, auditorías, entre otros.

La implementación de la evaluación del desempeño metrológico se realiza en correspondencia con lo establecido en la ISO 10012:2003, basada en el ciclo de Deming, lo que le ofrece un alto nivel de interacción con el resto de las normas ISO correspondientes a los diferentes sistemas de gestión.

En las empresas que han implantado estos sistemas se aplican criterios propios de cada entidad para la identificación y evaluación sistemática de los aspectos metrológicos. La evaluación metrológica puede aportar información para definir si un aspecto metrológico es significativo o no, y analizar en cada etapa el cumplimiento de los objetivos y metas previstos en el sistema, encontrando valides en la norma UNE 66180.

En relación con lo expuesto y bajo el concepto de evaluación del desempeño metrológico se realiza una búsqueda de información en bases de datos reconocidas como Elsevier, Emerald, Scopus, Scielo, entre otras, identificando un grupo de artículos científicos

relacionados con la temática, siendo analizados con el fin de identificar los aportes relevantes asociados al diseño de un modelo de evaluación del desempeño.

Investigaciones como las de los autores Valencia y Restrepo (2016) plantean el uso de técnicas como el Análisis de Ecuaciones Estructurales (SEM) que comprende el Análisis del Factor Confirmatorio (CFA) mediante un análisis de regresión. Otros como Osorio, Herrera y Vinasco, (2008) utiliza el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para establecer diferentes criterios para medir el desempeño del proceso. Otros autores como Sarache, Costa y Martínez (2014) proponen una metodología para evaluar el desempeño por medio de un indicador de gestión.

Ninguno de los autores anteriores menciona la evaluación del desempeño metrológico, sino que proponen vías de valoración del desempeño de forma general en una organización y no se enfocan en el sistema de gestión de las mediciones. Dentro de las investigaciones consultadas que tratan la evaluación del desempeño metrológico resaltan los autores: Beltrán, Muñuzuri, Rivas y González (2010) y Beltrán, Muñuzuri, Rivas y Martín (2011).

Se detecta la existencia de un modelo de evaluación de la gestión metrológica propuesto por Beltrán (2006), que ha sido desarrollado en diversos trabajos de aplicación y análisis experimental recogidos por Beltrán, González y Domingo (2007), hasta finalmente su incorporación en la norma UNE 66180:2008.

Los autores Beltrán, Muñuzuri, Rivas y Martín (2014), plantean que el modelo propuesto por Beltrán (2006) se basa en una combinación lineal de variables (equivalentes a los elementos que componen los requisitos de un sistema de gestión de las mediciones), partiendo del supuesto que todas contribuyen con igual fuerza al nivel de madurez global de la gestión metrológica de la organización.

En el 2014 los autores mencionados proponen realizar una ponderación de las variables obteniendo la importancia relativa de cada una de estas y constructos del mismo, así como su influencia en el resultado global, logrando un modelo donde las variables que lo forman ya no son equipotenciales y cada una tiene un peso asignado en función de su importancia. Demostrando en el 2015 que este modelo no tiene en cuenta dos aspectos importantes: el ciclo de mejora continua propuesto por Deming (utilizado por la ISO 10012:2003) y como segundo el nivel de madurez en la gestión metrológica de la empresa. Por tanto, es necesario reestructurar el modelo, haciéndolo robusto para la evaluación de la gestión metrológica en las empresas, garantizando la fiabilidad de sus medidas.

Es frecuente que las empresas identifiquen los riesgos metrológicos con el objetivo de realizar un estudio de las causas de las posibles amenazas y probables eventos no deseados, daños y consecuencias que puedan producir.

Dentro de la bibliografía consultada no sobresalen estándares o normas referidas a la evaluación del riesgo metrológico, sino que la mayor parte de las empresas trabajan con lo establecido en la norma ISO 31000. Debido a que este estándar proporciona un marco general para la gestión de riesgos, permitiendo su mejora e integración al sistema de gestión metrológica de la organización.

El enfoque de riesgo se ha aplicado con éxito en diferentes sistemas de gestión empresarial como la seguridad y salud en el trabajo, la gestión ambiental, entre otros. Esta tendencia no resulta ajena al sector de la energía.

Muchos países dentro de sus objetivos estratégicos tienen la producción de energía como eslabón esencial para su desarrollo, para lo que cuentan con instalaciones que permitan alcanzar este fin. Dentro de los sistemas de gestión de este tipo de industrias se incluye el proceso de controlar equipos de medición, siendo indispensable el aseguramiento metrológico para su correcto funcionamiento.

El sistema de gestión de las mediciones de estas empresas tiene bajo su control todo tipo de instrumentación y equipos existentes en cada uno de sus procesos, por lo que su seguimiento y evaluación permite obtener mediciones confiables, seguras y exactas para el control de sus procesos y la toma de decisiones.

En estas industrias se evidencia que se realizan evaluaciones metrológicas, siendo muchas de ellas sustentada en los requisitos y exigencias metrológicas de la base legal por medio de listas de chequeo y no por indicadores que cuantifiquen los aspectos metrológicos del sistema y permitan una evaluación del desempeño general, a lo que se adiciona que no siempre se utiliza el pensamiento basado en riesgo, aspecto relevante en el logro de la calidad de los sistemas de gestión.

A partir de los elementos antes mencionados, este trabajo persigue elaborar índices de riesgo metrológico para la evaluación del desempeño metrológico en empresas del sector de la energía. Para el desarrollo de la investigación se seleccionan tres organizaciones pertenecientes a dicho sector: una refinería de petróleo, una central termoeléctrica y una empresa comercializadora de energía eléctrica.

En relación con la metodología, para el desarrollo de este trabajo se realizó una investigación cuantitativa, que a partir de la utilización de un grupo de técnicas y/o herramientas y seguida de los correspondientes análisis permitieron definir el sistema de indicadores a partir del cálculo del índice de riesgo metrológico y el índice de riesgo en la gestión metrológica. Estos índices son elementos distintivos y novedosos que garantizan no solo su evaluación, sino también su utilización en la gestión de las mediciones en organizaciones del sector de la energía.

El trabajo se estructura como sigue: en primer lugar, se presentan los materiales y métodos, luego se presentan los resultados, es decir, los índices basados en riesgos, su campo de aplicación, formulación y método de cálculo para la evaluación del desempeño metrológico. Por último, se exponen las conclusiones.

DESARROLLO

Materiales y métodos

En el desarrollo de la investigación se utiliza la metodología general para la solución de problemas de Ingeniería Industrial, cuyas etapas se muestran a continuación.

Etapas I: Definición y análisis del problema

El propósito de esta etapa es la de maximizar la posibilidad de aislar y definir satisfactoriamente el problema. Hacer una lista detallada de las características del problema, incluyendo las restricciones. Se caracteriza por la obtención, investigación, aclaración y análisis de los problemas detectados. Hay que explicar a todos los implicados, gerencia y a los trabajadores los objetivos y el verdadero propósito del estudio a realizar.

Las principales técnicas a emplear para la definición y análisis del problema se tienen:

- Entrevistas
- Encuestas
- Métodos de expertos
- Técnicas de trabajo en grupo
- Técnicas matemáticas

Etapas II: Análisis y selección de alternativas de solución

Idear y desarrollar la mayor cantidad de soluciones posibles, para esto debe tenerse en cuenta las restricciones. Se buscan ideas y sugerencias que guíen hacia la solución. Entre las técnicas que pueden ser útiles en esta etapa se encuentran:

- La experiencia del analista
- Examen crítico
- Listas de comprobación
- Además, se utilizan todas las técnicas mencionadas en la etapa anterior.

Etapa III: Diseño de la solución

En esta etapa se deben evaluar las alternativas de solución propuestas, es decir, predecir cuantitativamente el comportamiento de cada una de ellas con respecto a cada uno de los criterios considerados. La existencia de muchos criterios y su interdependencia obliga, en ocasiones, a ignorar varios de ellos durante la evaluación, debido a limitaciones de criterios intangibles, los que no pueden expresarse cuantitativamente. Deben compararse las alternativas de solución y atendiendo a los criterios definidos por los especialistas o analistas seleccionar la mejor solución posible.

Etapa IV: Implementación

Esta etapa implica una delineación de los atributos y de las características de comportamiento de la solución seleccionada, siendo el propósito principal el de comunicar la solución a las personas involucradas, tales como:

- Las personas responsables de aprobar la solución.
- Las personas encargadas de la creación física de la solución.
- Las personas responsables de administrar la solución una vez en uso.
- Todo aquel que en el futuro necesite de las especificaciones detalladas de la solución.

Es posible que estas etapas se superpongan, por ejemplo, se puede concebir varias soluciones durante el período de formulación. Se debe registrar la solución de forma clara y con el detalle suficiente. El medio más común es el informe oral o escrito.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la investigación.

Etapa I: Definición y análisis del problema

Una de las organizaciones donde la metrología juega un papel fundamental son las del sector de la energía, debido a que existen procesos con alto riesgo operacional, así como un número importantes de instrumentos para el control de los mismos.

El sistema de gestión de las mediciones en este tipo de industria, como en otras, incluye todos los procesos donde se realizan mediciones; procesos de confirmación metrológica de los instrumentos de medición y los procesos de soporte necesarios, que son aquellos referentes a la asignación de responsabilidades, capacitación, competencia y formación del personal, la gestión y asignación de los recursos, auditorías, control de las no conformidades y la mejora continua, entre otros.

“Visión de Futuro” Año 19, Volumen N° 26 N° 1, Enero – Junio 2022 – Pág 38 - 60

URL de la Revista: <http://visiondefuturo.fce.unam.edu.ar/index.php/visiondefuturo/index>

URL del Documento: <https://visiondefuturo.fce.unam.edu.ar/index.php/visiondefuturo/issue/view/22>

ISSN 1668 – 8708 – Versión en Línea

E-mail: revistacientifica@fce.unam.edu.ar

Muchas empresas del sector de la energía, adolecen de una evaluación sistemática de su desempeño metrológico que, basada en un sistema de indicadores objetivos y sintéticos y desde un enfoque de riesgo, permita retroalimentar la gestión y orientar la toma de decisiones gerenciales con un carácter proactivo.

Etapas II y III: Análisis, selección y diseño de la solución

Definición y formulación de los índices de riesgos

Como punto de partida se toman las deficiencias existentes en la gestión metrológica empresarial, en particular dentro del sector energético, para realizar la evaluación del desempeño del sistema de gestión de las mediciones (SGM) y la utilización en las organizaciones del enfoque de riesgo como principio para evaluar el desempeño metrológico. A partir de estas, se definen el índice de riesgo metrológico (IRM) y el índice de riesgo en la gestión metrológica (IRGM) de empresas del sector energético que se definen como:

- IRM: Índice que evalúa los riesgos metrológicos materializados por las desviaciones respecto a estándares de desempeño, que afecta los componentes dirección, recursos, operativos y de mejora; existentes dentro del sistema de gestión de las mediciones.
- IRGM: Índice que evalúa los riesgos en la gestión metrológica, presentes por la incapacidad en coordinar las actividades para dirigir y controlar el sistema de gestión de las mediciones.

Para la formulación y definición de los índices se identifican los posibles riesgos metrológicos del SGM para empresas del sector de la energía, tomando como objeto de estudio organizaciones relevantes dentro del sector, como: una refinería, una central termoeléctrica y una empresa comercializadora de energía eléctrica.

Para identificar los riesgos presentes en el sistema de gestión de las mediciones en el grupo de empresas mencionadas, pertenecientes al sector energético se utiliza el método Delphi. Se selecciona 8 expertos, entre los que se encuentran especialistas de las organizaciones mencionadas. Es significativo destacar que el promedio de años de experiencia en la actividad de dichos expertos es de 27. Para la descripción de la competencia de los mismos, se combina la autovaloración y la evaluación de la competencia. En el perfil de competencia realizado no hay expertos de perfil de competencia bajo, mayoritariamente se encuentran entre medio y alto.

Las primeras dos rondas de consultas a los expertos (r1-r2) se dirigen a la identificación de los posibles riesgos por componentes metrológicos presentes en el sistema de gestión de las mediciones de las empresas mencionadas. Luego mediante dos rondas más (r3-r4) se selecciona los riesgos más significativos para el SGM.

Para verificar la concordancia de los expertos se utiliza el coeficiente de Kendall y la prueba de hipótesis no paramétrica correspondiente (λ^2), donde se obtuvo como resultado que en el equipo de trabajo existe concordancia con respecto al listado de los riesgos metrológicos identificados para las empresas del sector de la energía seleccionadas.

Se analiza la tabla de rangos promedios y de frecuencias para reducir factores. Con un valor de W de Kendall igual a 0,713, quedan definidos los veintinueve (29) riesgos los que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla N°1: Riesgos metrológicos seleccionados

Componente metrológico	Riesgo
Dirección	No medición de la eficacia y eficiencia de los procesos metrológicos del SGM por medio de indicadores.
	Incumplimiento de los requisitos del cliente y otra parte interesadas que precisan de la medición para evaluar su conformidad
	Incapacidad metrológica real de la organización que provoca el incumplimiento de los requisitos metrológicos.
	Incumplimiento con la planificación de la Confirmación Metrológica.
Recursos	Incompetencia del personal en la medida en que evolucionan los puestos de trabajo debido a los cambios en los equipos de medición, etc.
	No validación y aprobación del uso de software que se utiliza para los procesos de confirmación metrológica y medición.
	Se adquieren, instalan, sustituyen y distribuyen instrumentos de medición en la empresa sin informar al especialista en metrología para su control.
	Adquisición y distribución por parte de organismos superiores de instrumentos de medición sin trazabilidad en el país.
	No existencia de medios de embalaje para mover los instrumentos fuera de la empresa.
	No asignación de presupuesto para el desarrollo de la actividad metrológica
Operativos	No se identifica el estado de calibración y/o verificación del equipo de medición.
	Equipos sin calibrar y/o verificar.
	Desajustes en el establecimiento de los intervalos de calibración y /o verificación.
	No planificación de la calibración y/o verificación.
	Equipos de mediciones que no cumplen criterios de verificación metrológica.
	Inadecuada planificación de los intervalos de tiempo para la calibración y confirmación metrológica.
	No analizar los datos de calibraciones anteriores para poder optimizar los períodos de calibración /conformación metrológica.
	No contar con los certificados de calibración/verificación.
	No se estima la incertidumbre de medida para cada proceso de medición.
No existencia de trazabilidad de los resultados del proceso de medición.	
Análisis y mejora	No existe un sistema de medición y análisis para evaluar el desempeño o eficacia del sistema.
	Insatisfacción del cliente en cuanto al cumplimiento de sus necesidades metrológicas.
	No utilizar la información de los clientes y otras partes interesadas como fuente para la mejora del SGM.
	Las auditorías internas no evidencian las fortalezas y debilidades del sistema.
	No participación de la dirección en la evaluación del SGM
	Al tratarse una no conformidad de un equipo de medición dígase reparación, etc., no se vuelva a confirmar metrológicamente.
	No se identifican los equipos no conformes.
	No dar seguimiento y cierre en tiempo a las no conformidades detectadas.
Incumplimiento en el plan de auditorías internas.	

Fuente: Elaboración Propia

Definición del Índice de Riesgo Metrológico (IRM)

El nivel de desagregación del IRM está dado por: sistema, componentes metrológicos y riesgo, de forma ascendente, con el objetivo de construir los conceptos del índice sobre la

base del riesgo; premisa clave para la formulación del Índice de Riesgo del Sistema por Componente Metrológico y por Riesgo (ver figura 1).



Figura N°1: Nivel de desagregación para el análisis del sistema de gestión de las mediciones

Fuente: Elaboración Propia

Los componentes a evaluar son los contenidos en el sistema de gestión de las mediciones de la empresa, estos son: Dirección, Recursos, Operativos y Mejora, considerado de acuerdo a los criterios de la norma ISO 10012:2003.

Formulación del índice de riesgo metrológico (IRM)

Para formular el IRM se parte de la definición de riesgo y criterios expuestos por los autores López (2010) y González (2014) expuesta en la expresión (1).

$$R = P_o \times M_d \times D \quad (1)$$

donde:

R: Dimensión del riesgo.

P_o: Probabilidad de ocurrencia del riesgo.

M_d: Magnitud del daño.

D: Detección del riesgo.

Dado que la probabilidad de ocurrencia del riesgo (P_o) mide la proporción de la materialización del riesgo, se define entonces como la probabilidad estadística de que el riesgo ocurra.

$$P_o = P_r \quad (2)$$

donde:

Pr: Probabilidad del riesgo, dada por las desviaciones con respecto al umbral de referencia de los indicadores asociado a los riesgos evaluados.

La magnitud del daño que puede ocurrir si se materializa el riesgo evaluado depende en igual medida de la probabilidad de que ocurra daño y de la severidad de este, expresada matemáticamente en (3).

$$M_d = S_d \times P_d \quad (3)$$

donde:

Md: Magnitud del daño.

Sd: Severidad del daño.

Pd: Probabilidad del daño.

Como el IRM no solo está enfocado al riesgo si no también al daño que puede existir si este se materializa, de las expresiones anteriores se define:

$$IRM = P_r \times S_d \times P_d \times D \quad (4)$$

Mediante un análisis probabilístico realizado a la expresión anterior se determina que puede existir la posibilidad de que el riesgo ocurra y no exista daño alguno, o que el riesgo ocurra y halla daño; lo que indica que estas dos probabilidades se determinan mediante la intersección de la Pr con la Pd.

La consecuencia inmediata de la definición de probabilidad condicional según Walpole, Myers, Myers y Ye (2012) plantean:

$$P(r \cap d) = P(r) \times P(d/r) \quad (5)$$

donde:

Pr: Probabilidad del riesgo, dada por las desviaciones con respecto al umbral de referencia de los indicadores asociado a los riesgos evaluados.

P(d/r): Probabilidad de que ocurra el daño dado que se materialice el riesgo.

Luego; combinando (4) y (5) se obtiene la expresión (6) para evaluar el índice de riesgo metrológico (IRM) que constituye la expresión fundamental de la propuesta.

$$IRM = S_d \times [P(r) \times P(d/r)] \times D \quad (6)$$

donde:

IRM: Índice de riesgo metrológico.

Sd: Severidad del daño.

Pr: Probabilidad del riesgo, dada por las desviaciones con respecto al umbral de referencia de los indicadores asociado a los riesgos evaluados.

P(d/r): Probabilidad condicional del daño con respecto al riesgo, dada por la probabilidad de que cuando exista riesgo haya daño.

D: Detección del riesgo.

Probabilidad riesgo (Pr)

Para determinar la probabilidad estadística (Pr), se identifican a partir de referentes normativos y empíricos los indicadores de seguimiento asociados a cada riesgo.

Para determinar el valor de Pr, en caso de indicadores cualitativos los autores de la investigación asignan el valor de acuerdo a una escala ordinal (ver tabla 2) propuesta por López (2010) en su investigación.

Al tratarse de indicadores cualitativos, por ejemplo, evidencias, documentación, entre otros, solo se comprueba si está o no. Por tanto, se considera que al tener evaluado el componente del SGM analizado se le asigna un valor de 0.5, por el contrario, al no tenerlo evaluado se otorga el valor 1, siendo probable la materialización del riesgo.

Tabla N°2: Escala para asignar los valores de Pr a los riesgos asociados en caso de indicadores cualitativos

Criterio de desempeño	Pr
El SGM posee el aspecto evaluado por el indicador cualitativo	0,5
El SGM no posee el aspecto evaluado por el indicador cualitativo	1

Fuente: Adaptada de López (2010)

Cuando se trata de indicadores cuantitativos, por ejemplo, mediciones de equipos, productos, entre otros, en los que se pueden hacer varias mediciones, los valores de Pr son la compilación de las mediciones donde el indicador excede el límite de referencia, expresión (7) basada en la aplicación del concepto de probabilidad tomada de López (2010).

$$P_r = \frac{Nm \text{ (fuera de límite)}}{Ntm \text{ (evaluado)}} \quad (7)$$

donde:

Pr: Probabilidad del riesgo, dada por las desviaciones con respecto al umbral de referencia de los indicadores asociado a los riesgos evaluados.

Nm (fuera del límite): Número de mediciones donde la magnitud del riesgo supera el criterio de referencia.

Ntm (evaluado): Número total de mediciones en el período evaluado.

La probabilidad estadística Pr se determina en una escala cuantitativa continua, con valores entre 0 y 1, según el recorrido de la variable. El valor $P_r = 1$ indica que la probabilidad es máxima, y $P_r = 0$ que no se han producido desviaciones en el indicador por el que se mide el riesgo metrológico, que puedan constituir un peligro de ocurrencia de un daño en el período evaluado.

Severidad del daño (Sd)

Para la severidad del daño el grupo de expertos utiliza criterios expuestos por la ISO 31010:2019, Colectivo de autores (2007) y González (2014). A partir del análisis anterior se decide tomar seis criterios de evaluación (No es dañino; Ligeramente dañino; Medianamente dañino; Dañino; Altamente dañino y Extremadamente dañino) que son evaluados mediante una escala ordinal tipo Likert normalizado (tabla 3). El máximo valor de evaluación de la escala es 1 y el mínimo es 0, se divide el máximo número de la escala entre el número total de criterios de evaluación, para así determinar el rango de evaluación para dichos criterios, una vez materializado el daño, su severidad.

Tabla N°3: Evaluación de la severidad del daño

Valor (Sd)	Criterio de evaluación	Descripción
0	No es dañino	No ocurren daños ni pérdidas económicas. No afecta el desempeño del proceso
0,2	Ligeramente dañino	Daño sin importancia. Daños materiales y/o pérdidas económicas ínfimos. No afecta el desempeño del proceso.
0,4	Medianamente dañino	Daño importante. Se pueden cuantificar daños materiales y/o económicos, pero estos no son significativos. No es de consideración la afectación al desempeño del proceso.
0,6	Dañino	Daño serio. Pueden ocurrir pérdidas económicas, materiales, toma de decisiones incorrectas. Afecta el desempeño del proceso.
0,8	Altamente dañino	Daño muy serio. Pérdidas materiales y/o económicas de consideración, toma de decisiones incorrectas, así como lesiones a los trabajadores. Afectaciones de consideración al desempeño del proceso.
1	Extremadamente dañino	Daño de desastre. Pérdidas materiales y/o económicas muy altas, toma de decisiones incorrectas, así como lesiones a los trabajadores que le pudieran ocasionar secuelas e incluso la muerte. Grandes afectaciones al desempeño del proceso.

Fuente: Elaboración Propia

Probabilidad condicional (Pd/r)

Para determinar la probabilidad condicional, que exista daño dado que el riesgo se materialice (Pd/r), los expertos teniendo en cuenta la descripción del daño le asocian un

valor de probabilidad (tabla 4), siguiendo los criterios utilizados en la construcción de la tabla 3, con la diferencia que el valor mínimo de la escala es 0,1, debido a que siempre existe un mínimo de probabilidad.

Tabla N°4: Evaluación de la probabilidad condicional (Pd/r)

Descripción del daño	Probabilidad condicional (Pd/r)	Valor
El daño ocurrirá siempre	Probabilidad alta	1
El daño ocurrirá casi siempre	Probabilidad media	0,7
El daño ocurrirá en algunas ocasiones	Probabilidad baja	0,4
El daño ocurrirá raras veces	Probabilidad mínima	0,1

Fuente: Elaboración Propia

Detección del riesgo (D)

La posibilidad de detección se realiza mediante los controles establecidos. Ante la carencia de datos estadísticos, el grupo de trabajo utiliza los criterios de evaluación de acuerdo con la escala declarada por González (2014) en la tabla siguiente.

Tabla N°5: Criterios para establecer el nivel de detección del riesgo

Categoría de Detección	Probabilidad de detección
Incierto (1)	Los controles existentes no detectan el problema o no existe control
Bajo (0,8)	Poca posibilidad de que sea detectado el problema con antelación suficientes
Moderado (0,6)	En ocasiones se detecta el problema con antelación suficiente
Alto (0,4)	Alta probabilidad de ser detectado con antelación suficiente
Casi cierto (0,2)	Generalmente siempre se detecta el problema con antelación suficiente

Fuente: González, 2014.

Definición del Índice de Riesgo en la Gestión Metrológica (IRGM)

Al igual que el índice anterior el nivel de desagregación del IRGM está dado por: Sistema, Componentes Metrológicos y Riesgo, de forma ascendente. Para su desarrollo se mantienen los componentes a evaluar en el sistema de gestión de las mediciones (ver figura 1).

Formulación del índice de riesgo en la gestión metrológica (IRGM)

Para formular el IRGM se parte de la definición de riesgo expuesta en la expresión (1). La probabilidad de ocurrencia del riesgo (P_o) para este índice está dada por el coeficiente de gestión metrológica (C_m), pues la ocurrencia de riesgos depende en cierta medida del nivel de gestión metrológica de la empresa, es decir, este se puede llegar a materializar por problemas en la gestión. Se define entonces como el coeficiente de gestión metrológica, dando la medida de que puede ocurrir el riesgo por la incapacidad en su gestión.

$$P_o = C_m \quad (8)$$

donde:

C_m: Coeficiente de gestión del riesgo, dado por el nivel de atención de este.

Luego; combinando (6) y (8) se obtiene la expresión (9) para evaluar el índice de riesgo en la gestión metrológica (IRGM) que constituye la expresión fundamental de la propuesta de este índice.

El IRGM se expresa matemáticamente como:

$$IRGM = S_d \left(C_m \times P_{d/C_m} \right) \times D \quad (9)$$

donde:

S_d: Severidad del daño.

C_m: Coeficiente de gestión del riesgo, dado por el nivel de atención de este.

P_{d/C_m} : Probabilidad condicional del daño con respecto al coeficiente de gestión metrológica, dado por la ocurrencia de daños por la incapacidad en la gestión.

D: Detección del riesgo

Coeficiente de gestión metrológico (C_m)

El coeficiente de gestión (C_m) de cada riesgo se obtiene considerando el nivel de atención a las causas asociadas a los riesgos. El coeficiente se formula aplicando el método multicriterio discreto, basado en un modelo aditivo-multiplicativo, de acuerdo a la expresión (10) utilizada por López (2010).

$$C_m = \sum_{i=1}^n V_{(c)} \times C_{(i)} \quad (10)$$

donde:

C_m: Coeficiente de gestión del riesgo, dado por el nivel de atención de este.

C(i): Ponderación específica de cada causa de acuerdo a su importancia con respecto al riesgo asociado.

V(c): Valoración del nivel de atención de las causas asociadas a los riesgos metrológico evaluados.

A cada causa se le asocia un nivel de medición, con el objetivo de valorar el nivel de atención en su gestión. Para esto el grupo de expertos tienen en cuenta los criterios siguientes:

- Nivel de influencia sobre el riesgo
- Impacto del riesgo sobre el SGM

Se propone utilizar un nivel de medición ordinal tipo Likert (tabla 6) donde el valor normalizado se obtiene dividiendo cada número de la escala entre el máximo valor de

evaluación, que, a partir de los criterios de evaluación asignados según su nivel de atención para su gestión, se le otorga un valor numérico.

Para evaluar el nivel de atención de las causas el grupo de expertos utiliza criterios expuestos por la ISO 31010:2019; López (2010) y González (2014). A partir del análisis anterior se deciden tomar seis criterios de evaluación (No requiere atención; Atención mínima; Atención baja; Atención media; Atención alta y Atención muy alta) que son evaluados mediante una escala ordinal tipo Likert normalizado (tabla 6). El máximo valor de evaluación de la escala es 1 y el mínimo es 0, se divide el máximo número de la escala entre el número total de criterios de evaluación, para así determinar el rango de evaluación para dichos criterios.

Tabla N°6: Escala de evaluación para el nivel de atención de las causas

Valor (Vc)	Criterio de evaluación
0	No requiere atención
0.2	Atención mínima
0.4	Atención baja
0.6	Atención media
0.8	Atención alta
1	Atención muy alta

Fuente: Elaboración Propia

La identificación de las causas se realiza mediante diagramas de Ishikawa. Para determinar las ponderaciones C (i) o pesos es necesario jerarquizar cada una de las causas asociadas al riesgo metrológico correspondiente. Para la obtención de los pesos el método Saaty plantea realizar una jerarquización de primer nivel: causas por riesgo metrológico, para esto se utiliza el Proceso de Jerarquización Analítico (AHP) mediante el software SuperDecisions.

Como la severidad del daño (Sd), el nivel de detección (D) y la probabilidad condicional de (P^d/C_m) son valores determinados por la percepción de los expertos a partir de tablas de medición normalizadas (tabla 3, 4 y 5), estas variables se determinan de igual forma que en el índice anterior.

Índice de riesgo por componente metrológico (IRAM) y del sistema (IRS)

Dado que el índice de riesgo metrológico (IRM) y el índice de riesgo en la gestión metrológica (IRGM) presentan los mismos niveles de desagregación, para determinar el IRAM y IRS se utiliza la desagregación del sistema de la figura 1, compuesta por el sistema de gestión de las mediciones y los componentes metrológicos presentes en cada uno de estos procesos, así como los riesgos asociados a estos.

Luego se realiza una jerarquización de primer nivel utilizando el Proceso de Jerarquización Analítico (AHP), con el fin de determinar los pesos o ponderaciones (w) asociada a cada uno de los componentes metrológicos del sistema. Dichos pesos se obtienen empleando el software de apoyo SuperDecisions (ver tabla 7).

Tabla N°7: Pesos asociados a cada uno de los componentes metrológicos asociados al Sistema de Gestión de las Mediciones

Sistema	Componentes metrológicos	Pesos (Wa)
Sistema de Gestión de las Mediciones	Dirección	0,058713
	Recursos	0,254419
	Operativo	0,553336
	Mejora	0,133533

Fuente: Elaboración Propia

Con estos pesos se realiza la suma ponderada para el nivel desagregado en la figura 1, tomando como base los IRM e IRGM determinados anteriormente para cada riesgo metrológico. Obteniéndose entonces los valores del Índice de Riesgo por Componente Metrológico (IRCM) e Índice de Riesgo del Sistema (IRS) desde dos enfoques diferentes (materialización de riesgos y gestión metrológica) (expresión 11, 12, 13, 14).

$$IRCM_1 = Wa \left(\frac{\sum IRM}{n} \right) \quad (11)$$

$$IRCM_2 = Wa \left(\frac{\sum IRGM}{n} \right) \quad (12)$$

donde:

IRCM₁: Índice de riesgo por componente metrológico con base en el IRM.

IRCM₂: Índice de riesgo por componente metrológico con base en el IRGM.

Wa: Peso del componente metrológico.

n: Cantidad de riesgos por componente metrológico.

$$IRS_1 = \left(\frac{\sum IRM_1}{n} \right) \quad (13)$$

$$IRS_2 = \left(\frac{\sum IRGM_2}{n} \right) \quad (14)$$

donde:

IRS₁: Índice de riesgo del sistema con base en el IRM.

IRS₂: Índice de riesgo del sistema con base en el IRGM.

n: Total de componentes metrológicos del SGM.

Evaluación de los resultados

Para la valoración tanto cuantitativa como cualitativa de los resultados de los IRM e IRGM por cada riesgo, componente metrológico y sistema, se construye una escala, donde el número de intervalos considerados se determina aplicando la ecuación propuesta por Sturges (15), para un número de riesgos evaluados de $N=29$.

$$K = 1 + 3,322 \times \log N = 5,85 = 5 \quad (15)$$

donde:

N: Tamaño de la muestra

K: Número de intervalos

Una vez obtenido la cantidad de intervalos se determina el rango (R) según la expresión (16) y la amplitud (C) según (17)

$$R = \text{Valor (máx.)} - \text{Valor (min)} = 1 \quad (16)$$

donde:

R: Rango

Valor (máx.): Valor máximo del IRM, IRGM.

Valor (mín.): Valor mínimo del IRM, IRGM.

$$C = \frac{R}{K} = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (17)$$

Según C, se establecen las escalas cuantitativas y cualitativas (tabla 8), donde (x) representa la magnitud de IRM, IRGM.

Tabla N°8: Escala de evaluación cualitativa para los valores evaluados IRM e IRGM

Intervalo	Valoración cualitativa para IRM	Valoración cualitativa para IRGM	Actitud ante la prioridad
$0 < x < 0,2$	Bajo	Bajo	Se recomienda solamente continuar el monitoreo del componente.
$0,2 < x < 0,4$	Tolerable	Tolerable	Se recomienda analizar el posible incumplimiento de la legislación metrológica vigente y otros aspectos en el desempeño del SGM, incorporándose como prioridades para la empresa.
$0,4 < x < 0,6$	Moderado	Moderado	Se recomienda adoptar medidas que permitan mitigar el riesgo a corto plazo, incorporándose como prioridades para la empresa.
$0,6 < x < 0,8$	Alto	Alto	Se recomienda adoptar medidas inmediatas para reducir el riesgo.
$0,8 < x < 1$	Muy Alto	Muy Alto	Se recomienda detener las operaciones y adoptar medidas inmediatas para reducir el riesgo.

Fuente: Elaboración Propia

El resto de los índices obtenidos por las expresiones 11, 12, 13, 14 se evalúan utilizando la tabla anterior según el enfoque que presentan (materialización de riesgos o gestión metrológica): IRM o IRGM, es decir, la escala permite para un mismo intervalo y valoración cualitativa obtener una evaluación para dichos índices.

Los indicadores metrológicos son la principal fuente de información para evaluar los índices de riesgos. La aplicación de este por parte de las empresas debe ser anual, acortándose o extendiéndose su frecuencia de evaluación a partir de determinados eventos o situaciones dentro del entorno empresarial, por lo que las organizaciones deben preparar a sus especialistas en metrología con el uso de esta herramienta o emplear consultores.

El análisis de los resultados de esta evaluación permite alcanzar información concreta y de gran utilidad, a partir de la que se pueden obtener conclusiones.

Etapa IV: Implementación

Luego de aprobado los índices y definida la documentación para la recopilación de la información se procede a su cálculo en las empresas mencionadas. Se debe decidir el período en que se tomaran los datos para su cálculo. Esta etapa no es tratada en la investigación debido a que todavía se encuentra en proceso de ejecución.

CONCLUSIONES

1. Los índices metrológicos propuestos demuestran su novedad, pertinencia y utilidad para el propósito con el que fueron concebidos, en niveles aceptables de consenso y satisfacción por parte del grupo de expertos consultados, competentes con el tema investigado.
2. El uso y manejo de índices metrológicos, desde sus dos perspectivas, de materialización de riesgos y gestión de riesgos (IRM e IRGM) como punto de partida en el proceso de gestión de las mediciones, constituye la contribución fundamental de la presente investigación a este proceso, al constituir una guía y fundamento básico para los sistemas de gestión de las mediciones.
3. La utilización de un sistema de indicadores a partir del cálculo del índice de riesgo metrológico (IRM) y el índice de riesgo en la gestión metrológica (IRGM), permiten la evaluación del desempeño metrológico y su monitoreo sistemático, así como el proceso de mejora continua. Estos índices son elementos distintivos y novedosos, que garantiza no solo su evaluación, sino también su utilización en la gestión de las mediciones en organizaciones del sector de la energía.

BIBLIOGRAFÍA

- Beltrán, J. (2006). Análisis de un modelo de autoevaluación y de un proceso de auditoría de los sistemas de gestión de las mediciones basados en la norma UNE-EN ISO 10012:2003. (tesis de doctorado), UNED, Madrid, España.
- Beltrán, J., González, C., y Domingo, R. (2007). Results of the application of an evaluation model and audit process for measurement management systems based on ISO 10012 in the framework of the environmental management systems in accordance with ISO 14001. Proceedings of the 2nd International Congress Energy and Environmental Engineering and Management. Badajoz.
- Beltrán, J., Muñuzuri, J., Rivas, M. A., y González, C. (2010). Metrological management evaluation based on ISO 10012: an empirical study in ISO -14001- certified Spanish companies. *Energy*, 35(1), 140-147. <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.004>
- Beltrán, J., Muñuzuri, J., Rivas, M. A. y Martín, E. (2014). Development of a metrological management model using the AHP and SEM techniques. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 31(7), 841-857. <http://dx.doi.org/10.1108/IJQRM-05-2010-0068>
- Colectivo de autores. (2007). Seguridad y Salud en el Trabajo. La Habana: Editorial Félix Varela.
- González, E. (2014). Despliegue de la calidad en la gestión de procesos sustantivos de instituciones de educación superior cubana. (tesis de doctorado). Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Hernández, A. R., y Reyes, Y. (2013). Cincuenta años de aseguramiento a la economía cubana: Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología. *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 3(2), 1-12. [Fecha de Consulta 19 de Agosto de 2020]. ISSN: 2304-0106. Disponible en: <https://www.revistaccuba/index.php/revacc/article/view/81>
- ISO 9001: 2015. Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos. Ginebra, Suiza.
- ISO 10012: 2007. Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. Ginebra, Suiza.
- ISO 14001: 2015 Sistemas de Gestión Ambiental. Requisitos con orientación para su uso. Ginebra, Suiza.
- ISO 31000: 2015 Gestión del Riesgo. Principios y directrices. Ginebra, Suiza.
- ISO/IEC 31010: 2015 Gestión del Riesgo. Técnicas de apreciación del riesgo. Ginebra, Suiza.

- ISO 45001: 2018 Sistemas de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo. Requisitos con orientación para su uso. Ginebra, Suiza.
- Llamosa, L. E., Milton, F. y Villareal, C. (2011). La importancia de la metrología como tema transversal en la formación en ciencias básicas. *Scientia Et Technica*, 17(47), 158-162. <http://dx.doi.org/10.22517/23447214.503>
- López, E., Pérez, M., Cabrera, Y., López, E., Escoriza, T. y Galvéz, A. M. (2021). Consideraciones acerca del desempeño metrológico en unidades de salud. *Medisur*, 19(1), 142-156. [Fecha de Consulta 15 de Febrero de 2021]. ISSN: 1727-897X. Disponible en: <http://medisur.sld.cu/index.php/medisur/article/view/4530>
- López, L. (2010). Tecnología para la Evaluación del Desempeño Ambiental de empresas hoteleras basada en índices de riesgo. Caso- Varadero. (tesis de doctorado). Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.
- Oramas, A. (2014). Calibración y verificación: ¿Qué tan útiles y compatibles son? La Habana: Memorias del 9no Simposio Internacional "Metrología 2014".
- Osorio, J. C., Herrera, M. F., y Vinasco, M. A. (2008). Modelo para la evaluación del desempeño de los proveedores utilizando AHP. *Ingeniería y Desarrollo*, (23), 43-58. [Fecha de Consulta 19 de Octubre de 2020]. ISSN: 0122-3461. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85202305>
- Reyes, Y., Álvarez, L., y Hernández, A. R. (2011). Importancia de la metrología y su repercusión en el desarrollo. *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 1(1), 1-9. [Fecha de Consulta 19 de Agosto de 2020]. ISSN: 2304-0106. Disponible en: <https://www.revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/11>
- Sarache, W. A., Costa, Y. J., y Martínez, J. P. (2015). Evaluación del desempeño ambiental bajo enfoque de cadena de abastecimiento verde. *Revista DYNA*, 82(189), 207-2015. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n189.48550>
- Sotelo, J. G., Sosa, M. C., y Carreón, E. (2020). Validación del instrumento de evaluación de desempeño de un sistema de gestión de calidad en una institución de educación superior. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 10(20). <https://doi.org/10.23913/ride.v10i20.653>
- UNE 66180:2008 Guía para la gestión y evaluación metrológica. AENOR, Madrid, España.
- Valencia, M., y Restrepo, J. A., (2016). Evaluación de la gestión financiera usando variables latentes en modelos estocásticos de fronteras eficientes. *Revista DYNA*, 83(199), 35-40. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n199.54612>
- Warpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. y Ye, K. (2012). Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencia (9na ed.). México: Editorial Pearson.

RESUMEN BIBLIOGRÁFICO

Aníbal Barrera García

Máster en Ciencias en Matemática Aplicada, Máster en Ciencias en Ingeniería Industrial (Mención Calidad). Profesor Auxiliar del Departamento de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cienfuegos. Áreas de experiencia: Metrología, Ingeniería de Calidad, Gestión de Calidad y Sistemas Integrados de Gestión.

Michael Feitó Cespón

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cienfuegos. Áreas de experiencia: Logística y Cadenas de Suministro, Gestión de Operaciones, Investigación de Operaciones, Matemáticas Aplicadas y Análisis del Ciclo de Vida.

Roberto Cespón Castro

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Universidad Central de Las Villas. Experto del Ministerio de Educación Superior de Cuba, para la acreditación de carreras de pregrado, programas de maestría y de formación doctoral. Áreas de experiencia: Administración de la Producción y las Operaciones, Logística Empresarial y Logística Inversa.