

Verificación y calibración de llaves dinamométricas en contextos industriales latinoamericanos: estudio aplicado en Barranquilla

Freddy Sanjuan Salcedo

Magister en Gerencia de Proyectos de I+D+I, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, freddy_sanjuan@hotmail.com. Barranquilla

Isabel Cristina Niño Camacho

Doctora en Ciencias Mención Gerencia, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, iscristin26@hotmail.com. Barranquilla

Recibido: 12/11/2025 - **Aceptado:** 13/01/2026 - **Publicado:** 06/03/2026

RESUMEN

La verificación y calibración de las llaves dinamométricas constituyen un proceso fundamental para garantizar la exactitud en la aplicación del torque y la seguridad en los entornos industriales. Sin embargo, en muchas empresas latinoamericanas persisten brechas significativas en la implementación de procesos metrológicos adecuados, lo que puede generar fallas estructurales, afectaciones en la calidad de productos y riesgos operativos. Este estudio tiene como propósito analizar las prácticas de verificación y calibración de llaves dinamométricas en empresas y laboratorios de Barranquilla, evaluando su frecuencia, métodos utilizados, barreras percibidas y el grado de alineación con estándares internacionales. Se desarrolló una investigación con enfoque mixto y alcance exploratorio–descriptivo. Se aplicaron encuestas a 50 empresas y laboratorios y se realizaron entrevistas semiestructuradas a 10 expertos técnicos con experiencia en procesos de calibración. Los resultados muestran que el 45 % de las organizaciones calibran sus llaves cada 12 meses, mientras que un 30 % lo hace solo cuando se presentan fallas. Predominan los métodos manuales (60 %) sobre los automáticos (25 %), debido principalmente a limitaciones económicas y falta de infraestructura. Las principales barreras identificadas incluyen altos costos de los equipos de calibración, escasa capacitación técnica y ausencia de trazabilidad sistemática.

El estudio concluye que las prácticas locales se encuentran parcialmente alineadas con los estándares internacionales, pero persisten retos importantes en materia de formación, inversión tecnológica y fortalecimiento de los sistemas metrológicos. Se presentan recomendaciones para mejorar los procesos de calibración y promover una mayor cultura de seguridad y calidad industrial en la región.

Palabras clave: Metrología; Torque; Calibración; Verificación; Seguridad industrial.

ABSTRACT

The verification and calibration of torque wrenches are essential processes to ensure accuracy in torque application and to maintain safety in industrial environments. However, many Latin American companies still face significant gaps in the implementation of adequate metrological practices, which can lead to structural failures, compromised product quality, and operational risks. This study aims to analyze the verification and calibration practices of torque wrenches in companies and laboratories in Barranquilla, evaluating their calibration frequency, methods used, perceived barriers, and the degree of alignment with international standards. A mixed-methods approach with an exploratory–descriptive scope was employed. Surveys were administered to 50 companies and laboratories, and semi-structured interviews were conducted with 10 technical experts experienced in torque calibration processes. Findings indicate that 45% of organizations calibrate their torque wrenches every 12 months, while 30% do so only when failures occur. Manual methods (60%) prevail over automated ones (25%), mainly due to economic constraints and limited infrastructure. The main barriers identified include high calibration equipment costs, lack of technical training, and insufficient systematic traceability. The study concludes that local practices are only partially aligned with international standards, and significant challenges remain in terms of training, technological investment, and strengthening metrological systems. Recommendations are provided to improve calibration practices and promote a stronger culture of industrial safety and quality in the region.

Keywords: Industrial metrology; Torque; Calibration; Verification; Industrial safety.

1. INTRODUCCION

La correcta aplicación del torque es un elemento crítico en múltiples sectores industriales, entre ellos la manufactura, la construcción, la automoción, la aeronáutica y el mantenimiento mecánico. La función principal de una llave dinamométrica es asegurar que la fuerza aplicada a un tornillo, perno o unión mecánica sea consistente y equivalente al valor especificado, reduciendo la probabilidad de fallas por sobreajuste o por torque insuficiente. La literatura internacional coincide en resaltar que la falta de calibración puede generar incumplimientos de calidad, desgaste prematuro de componentes, fallas operativas e, incluso, accidentes laborales de alto impacto.

A pesar de estas implicaciones, en regiones latinoamericanas, incluida Colombia, persiste un uso limitado de protocolos sistemáticos de verificación y calibración de llaves dinamométricas. La ausencia de trazabilidad; el uso de métodos manuales sin respaldo metrológico; la dependencia de mantenimiento correctivo; y las dificultades económicas para acceder a equipos avanzados representan barreras significativas para la estandarización de prácticas adecuadas. En Barranquilla, donde convergen diversos sectores industriales, esta problemática es especialmente relevante. Este comportamiento coincide con lo señalado por proveedores nacionales de servicios metrológicos, que destacan la baja estandarización de las prácticas de calibración en el sector industrial colombiano (Sumincol, s.f.).

Existe una brecha evidente entre las prácticas reales de las empresas y las recomendaciones técnicas definidas por estándares internacionales como ISO 6789 (*ISO, 2017a; ISO, 2017b*), así como por institutos metrológicos reconocidos. La mayoría de estudios previos se han centrado en aspectos técnicos de los equipos de torque o en análisis internos de laboratorios,

pero son escasas las investigaciones aplicadas que caractericen el comportamiento de las empresas frente a la calibración de estas herramientas.

En este contexto, el presente estudio se orienta a analizar cómo se verifican y calibran las llaves dinamométricas en empresas y laboratorios de Barranquilla, con el fin de identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora. Este análisis cobra relevancia para la formación técnica, la gestión de la calidad y la seguridad industrial en la región.

1. Objetivo general

Analizar las prácticas de verificación y calibración de llaves dinamométricas utilizadas en empresas y laboratorios de Barranquilla para determinar su frecuencia, métodos empleados, barreras de implementación y nivel de alineación con estándares internacionales.

1.1 Objetivos específicos

Identificar la frecuencia con que las empresas realizan procesos de verificación y calibración. Describir los métodos de calibración más utilizados.

Determinar las principales barreras percibidas para su implementación.

Comparar las prácticas actuales con estándares internacionales y buenas prácticas técnicas.

2. MARCO TEÓRICO Y/O ANTECEDENTES

La medición del torque es un componente crítico en la ingeniería mecánica y en los sistemas de ensamble industrial, debido a que garantiza la integridad funcional y estructural de uniones roscadas. La aplicación correcta del par torsional permite asegurar la estabilidad de elementos como tornillos, pernos y accesorios, especialmente en sectores de alto riesgo como la aeronáutica, la automoción, la energía y la manufactura pesada. Una aplicación insuficiente de torque puede conducir al aflojamiento progresivo de la unión, mientras que un exceso de par puede provocar deformación plástica, fracturas o fallas catastróficas en operación. Estudios técnicos han demostrado que la incertidumbre asociada a la medición del torque influye significativamente en la confiabilidad de las uniones, por lo que su control y estandarización resulta esencial dentro de un sistema de gestión de calidad industrial.

2.1 Llaves dinamométricas y su función en la industria

Las llaves dinamométricas son herramientas diseñadas para aplicar torque controlado y reproducible. Existen diversos tipos de dispositivos, tales como llaves de clic, electrónicas, hidráulicas y de dial, cada una con características operativas específicas relacionadas con rangos de medición, resolución, robustez mecánica y condiciones ambientales de operación. La amplia variedad de herramientas disponibles responde a las necesidades diferenciadas de sectores productivos, que requieren desde procedimientos de montaje manual hasta calibraciones de alta precisión con control automatizado. En sistemas industriales cada vez más complejos, la necesidad de mantener estas herramientas en condiciones óptimas de funcionamiento constituye un factor determinante para la seguridad y la eficiencia operativa. Además, guías prácticas de calibración destacan la importancia de verificar periódicamente el mecanismo interno de la llave para garantizar lecturas estables (Tomic Tools, 2023). Estas

prácticas son promovidas también por organismos internacionales, que resaltan la importancia de la calibración periódica para asegurar la trazabilidad metrológica (GNBS Guyana, 2020).

2.2 Conceptos metrológicos aplicados al torque

La metrología establece principios fundamentales que permiten asegurar la confiabilidad de las mediciones. Entre estos se destacan:

Exactitud, entendida como la cercanía entre el valor medido y el valor verdadero.

Repetibilidad, que refleja la consistencia de un instrumento cuando se aplica el mismo método sobre un objeto bajo condiciones similares.

Trazabilidad, entendida como el vínculo documentado entre la medición y patrones internacionales a través de cadenas ininterrumpidas de calibración.

Incertidumbre, definida como el parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse a la magnitud medida.

Los estudios disponibles para calibración de torque describen que la estimación de incertidumbre constituye una etapa obligatoria dentro de los métodos aceptados internacionalmente, y que fuentes como la resolución del sistema, la alineación mecánica, el comportamiento del transductor y las variaciones ambientales pueden influir significativamente en el resultado final (Norbar, 2008). Estudios experimentales demuestran que pequeñas variaciones en la aplicación del torque pueden generar niveles significativos de incertidumbre en la medición (University of Nairobi, 2014).

2.3 Normas internacionales para la calibración de llaves dinamométricas

La calibración de herramientas de torque está regulada por un marco normativo internacional robusto. Las normas ISO 6789-1:2017 e ISO 6789-2:2017 (International Organization for Standardization [ISO], 2017a, 2017b) constituyen los referentes más importantes:

ISO 6789-1:2017 (International Organization for Standardization [ISO], 2017a), define los requisitos de diseño, ensayos de conformidad, métodos de verificación y criterios de marcado de las llaves dinamométricas manuales. Establece las cargas mínimas, puntos de ensayo dentro del rango del instrumento y tolerancias permitidas para garantizar la consistencia operativa.

ISO 6789-2:2017 (International Organization for Standardization [ISO], 2017b) establece los requisitos para la calibración formal de herramientas de torque, detallando procedimientos, intervalos, condiciones ambientales y métodos para calcular la incertidumbre de medición derivada del proceso de calibración.

Estas normas aportan lineamientos técnicos esenciales para laboratorios, fabricantes y empresas que requieren trazabilidad metrológica como parte de sus sistemas de aseguramiento de calidad. Las guías técnicas recientes insisten en el uso de procedimientos estandarizados para la calibración de torque (GNBS, 2020).

2.4 Protocolos y guías europeas complementarias: PTB y DKD

El Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), instituto nacional de metrología de Alemania, ha contribuido de manera significativa al desarrollo de procedimientos estandarizados en torque. Sus lineamientos DKD-R 3-7 y DKD-R 3-8 describen métodos de calibración estática y ensayos para dispositivos de calibración de llaves dinamométricas, así como los requisitos para la validación de equipos de transferencia de torque. Estas guías se utilizan ampliamente en laboratorios acreditados de Europa para asegurar niveles elevados de precisión y repetibilidad.

Las guías del PTB aportan un enfoque detallado sobre:

- Procedimientos de precarga de la llave antes de ser calibrada.
- Ensayos en múltiples puntos del rango de medición.
- Validación de dispositivos de transferencia y bancos de torque.
- Control de efectos ambientales sobre el comportamiento del instrumento.

2.5 Normas y procedimientos latinoamericanos: NMX, CEM e INM

En América Latina existen esfuerzos significativos para armonizar procesos de calibración con los estándares internacionales. Entre los más destacados:

- La norma mexicana NMX-CH-6789-IMNC-2006 (Secretaría de Economía – IMNC, 2006), considerada la primera norma regional para calibración de herramientas de torque, establece requisitos y métodos para la verificación de conformidad y calibración de llaves manuales. Fue desarrollada con apoyo del Centro Nacional de Metrología (CENAM) e incorpora conceptos compatibles con ISO 6789.
- El Centro Español de Metrología (CEM, s.f.) ha publicado procedimientos detallados para la calibración de instrumentos de par de torsión mediante métodos comparativos con patrones trazables, constituyendo una referencia esencial para países hispanohablantes.
- En Colombia, el Instituto Nacional de Metrología (INM, s.f.) desempeña un papel clave en el fortalecimiento de la infraestructura metrológica nacional. Sus servicios y documentos técnicos describen protocolos de calibración, buenas prácticas y lineamientos estratégicos, orientando a empresas y laboratorios hacia estándares internacionales y promoviendo el uso adecuado de herramientas de torque en el sector industrial.

En coherencia con las normas descritas, diversos institutos y órganos metrológicos han desarrollado estándares y guías técnicas que regulan los procedimientos de calibración de llaves dinamométricas. Estos documentos constituyen la base normativa que orienta las prácticas de verificación, control de incertidumbre y trazabilidad en los laboratorios de calibración. A continuación, se presenta una síntesis comparativa de los estándares más relevantes utilizados a nivel internacional y latinoamericano.

Tabla 1

Estándares de calibración de llaves dinamométricas según institutos metroológicos internacionales y latinoamericanos

Instituto Metroológico	Norma / Estándar	Alcance
CENAM (México)	NMX-CH-6789-IMNC-2006	Calibración de llaves dinamométricas en rangos de torque; armonización con ISO 6789.
INM (Colombia)	Protocolo nacional para calibración de llaves dinamométricas	Trazabilidad y calibración para diversas industrias; soporte a laboratorios acreditados.
INTI (Argentina)	Normas INTI para calibración de herramientas de torque	Establecimiento de patrones nacionales de medición de torque.
PTB (Alemania)	DKD-R 3-7 y 3-8	Calibración estática de llaves dinamométricas y dispositivos de calibración.
CEM (España)	ME013 (calibración de instrumentos de medida de par eléctricos)	Guía para calibración y verificación de par eléctrico e industrial.

Nota: Elaboración propia

2.6 Infraestructura metroológica y brechas en América Latina

Diversos estudios han señalado desafíos estructurales en la región vinculados con la adopción de prácticas de calibración alineadas a estándares internacionales. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2022) destaca la necesidad de fortalecer capacidades técnicas, digitalizar procesos de medición (Metrología 4.0) y mejorar la articulación entre institutos de metrología y el sector productivo para garantizar servicios confiables y competitivos en términos internacionales.

Asimismo, comparaciones bilaterales realizadas entre el CENAM (México) y el INM (Colombia), particularmente el ejercicio SIM.M.T-S2 sobre la calibración de una llave dinamométrica de referencia, evidencian avances en la armonización regional, pero también importantes heterogeneidades en las capacidades de medición y en los niveles de incertidumbre alcanzados por los laboratorios participantes (Galván, Martínez & López, 2019). Igualmente, estos estudios de intercomparación muestran variaciones significativas en capacidades de medición entre laboratorios acreditados de diferentes países (IMEKO, 2015).

Estudios técnicos adicionales indican que muchas pequeñas y medianas empresas latinoamericanas enfrentan barreras económicas, falta de personal capacitado y limitaciones en infraestructura metroológica, lo que conduce a una baja frecuencia de calibración, dependencia de métodos manuales y ausencia de trazabilidad documental adecuada. Estas brechas coinciden con los hallazgos empíricos de esta investigación, que muestran patrones similares en las empresas de Barranquilla.

3. METODOLOGIA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, integrando técnicas cuantitativas y cualitativas con el fin de obtener una comprensión amplia y profunda sobre las

prácticas de verificación y calibración de llaves dinamométricas en empresas y laboratorios de Barranquilla. Este enfoque permitió contrastar datos numéricos provenientes de encuestas con percepciones especializadas de expertos técnicos, logrando así una triangulación robusta de la información recolectada.

3.1 Enfoque de investigación

El estudio adopta un diseño mixto con integración secuencial, apropiado para fenómenos que requieren caracterización del comportamiento real de las organizaciones y, al mismo tiempo, comprensión interpretativa de los procesos técnicos involucrados. El componente cuantitativo permitió analizar tendencias relacionadas con frecuencias de calibración, métodos empleados y barreras reportadas; mientras que la fase cualitativa proporcionó información contextualizada sobre los desafíos técnicos y organizacionales que enfrentan las empresas. Este diseño responde a la necesidad de comprender tanto la magnitud del problema como las razones que explican su persistencia.

3.2 Alcance y tipo de estudio

La investigación posee un alcance exploratorio-descriptivo, en tanto que el objetivo central fue identificar, describir y analizar las prácticas actuales de verificación y calibración de llaves dinamométricas en empresas del sector productivo de Barranquilla. Dado que existen pocos estudios aplicados en la región sobre este tema, dicho alcance resulta pertinente para caracterizar el estado actual del proceso y delimitar futuras líneas de investigación e intervención técnica.

3.3 Población y muestra

La población estuvo conformada por empresas y laboratorios de la ciudad de Barranquilla que emplean llaves dinamométricas en sus procesos de producción, mantenimiento o aseguramiento metrológico.

50 empresas y laboratorios participaron voluntariamente en la aplicación de encuestas estructuradas.

Para el componente cualitativo, se seleccionaron 10 expertos técnicos con reconocida experiencia en calibración de instrumentos de torque, verificación metrológica y mantenimiento industrial.

Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que la participación dependió del acceso, disponibilidad y vinculación directa de las empresas con actividades relacionadas con el uso de llaves dinamométricas.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de información

3.4.1 Encuesta estructurada

La encuesta se diseñó para caracterizar aspectos clave relacionados con:

- Frecuencia de calibración de llaves dinamométricas.
- Métodos utilizados (manuales, digitales, híbridos).
- Barreras o dificultades para implementar calibraciones periódicas.
- Nivel de conocimiento técnico asociado al proceso de calibración.

- Percepción del impacto de la calibración en la calidad y seguridad industrial.

El instrumento se estructuró en preguntas cerradas de opción múltiple y dicotómicas, permitiendo un análisis estadístico claro y comparable entre empresas.

3.4.2 Entrevista semiestructurada

Las entrevistas fueron diseñadas con preguntas guía que permitieron profundizar en:

- La trazabilidad metrológica aplicada a instrumentos de torque.
- Problemas técnicos experimentados en procesos de calibración.
- Disponibilidad de infraestructura y equipos de calibración.
- Impacto organizacional de la calibración en la reducción de fallas y riesgos.

Este instrumento facilitó la obtención de relatos detallados y experiencias propias de profesionales del sector.

3.5 Procedimiento de recolección

La recolección se realizó en tres fases:

- Fase documental: revisión de normas y protocolos internacionales (ISO 6789-1:2017 y 6789-2:2017), regionales NMX-CH-6789-IMNC-2006 (Secretaría de Economía IMNC, 2006) y los procedimientos publicados por el Centro Español de Metrología (CEM, s.f.). También se consultaron lineamientos emitidos por el Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM, s.f.) y documentación técnica del Centro Nacional de Metrología de México (CENAM, 2015; CENAM, 2021).
- Fase cuantitativa: aplicación de encuestas a 50 empresas y laboratorios mediante visitas y/o reuniones virtuales.
- Fase cualitativa: realización de entrevistas semiestructuradas a expertos, registradas mediante notas de campo y matrices de análisis temático.

3.6 Análisis de datos

3.6.1 Análisis cuantitativo

Los datos obtenidos de las encuestas fueron procesados mediante estadística descriptiva, calculando:

- Porcentajes de adopción de prácticas de calibración (frecuencia).
- Distribución por métodos de calibración (manual, automático).
- Porcentaje de barreras reportadas (costo, capacitación, resistencia al cambio).

3.6.2 Análisis cualitativo

Para la información recolectada en entrevistas, se utilizó un análisis de contenido, clasificando las respuestas en categorías temáticas emergentes:

- Trazabilidad metrológica
- Capacidades técnicas
- Desafíos operativos
- Condiciones tecnológicas y económicas
- Percepción del riesgo

Esta triangulación permitió comparar las prácticas reales identificadas en las empresas con los lineamientos técnicos estandarizados por ISO, PTB, CEM e INM.

3.7 Consideraciones éticas

El estudio se desarrolló respetando principios éticos fundamentales:

- Participación voluntaria e informada.
- Confidencialidad en la información proporcionada.
- Uso exclusivo de los datos con fines académicos e investigativos.
- No se recopilaron datos sensibles ni se realizaron intervenciones sobre procesos técnicos o productivos de las empresas.

Estas medidas garantizan la integridad del estudio y la protección de la información suministrada por los actores consultados.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS O HALLAZGOS

El análisis de los datos obtenidos a través de las encuestas aplicadas a 50 empresas y laboratorios de Barranquilla y de las entrevistas realizadas a 10 expertos técnicos permite identificar patrones consistentes respecto al estado actual de las prácticas de verificación y calibración de llaves dinamométricas en la ciudad. La integración de los resultados cuantitativos y cualitativos evidencia brechas importantes entre los procedimientos adoptados por las empresas locales y los lineamientos establecidos en las normas internacionales ISO 6789-1:2017 e ISO 6789-2:2017 (International Organization for Standardization [ISO], 2017a, 2017b), las cuales definen criterios específicos de diseño, verificación y calibración para herramientas de torque.

4.1 Frecuencia de calibración de llaves dinamométricas

Los resultados muestran una variabilidad significativa en la periodicidad de las calibraciones:

Tabla 2

Frecuencia de calibración de llaves dinamométricas en empresas de Barranquilla

Categoría de frecuencia	Porcentaje (%)
Anual	45 %
Correctiva	30 %
Semestral	10 %
Nunca o esporádica	15 %

Nota: Elaboración propia

Este comportamiento evidencia que la mayoría de empresas no cumplen con los intervalos establecidos en las normas ISO, las cuales indican que la frecuencia debe definirse con base en la intensidad de uso, condiciones ambientales, criticidad del proceso y cambios en el comportamiento del instrumento.

La tendencia hacia la calibración correctiva (30 %) es particularmente crítica, pues incrementa el riesgo de imprecisiones acumuladas y fallas de ensamble, en contravía de las guías publicadas por Centro Nacional de Metrología de México (CENAM, 2015; CENAM, 2021) y del Centro Español de Metrología (CEM, s.f.), que enfatizan la importancia de la prevención y la trazabilidad continua.

4.2 Métodos de calibración empleados

Las empresas reportaron tres enfoques principales para la calibración de sus llaves dinamométricas:

Tabla 3

Métodos de calibración empleados por empresas de Barranquilla

Método de calibración	Porcentaje (%)
Manual	60 %
Automático	25 %
Híbrido	15 %

Nota: Elaboración propia

El predominio de métodos manuales refleja limitaciones tecnológicas y presupuestales en la región. Si bien estos métodos pueden ser válidos, dependen en gran medida de la habilidad del operador y del control riguroso de las condiciones ambientales. Estudios como los del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, 2015) y por el comité técnico DKD-R del Deutsche Kalibrierdienst (PTB & DKD, 2014) enfatizan que la intervención humana aumenta la incertidumbre y puede introducir variaciones significativas en el proceso de calibración. En coherencia con estos hallazgos, la directriz DAkkS-DKD-R 3-7 también señala la necesidad de controlar rigurosamente los factores humanos y las condiciones de operación para garantizar resultados confiables en certificados de calibración (SCS Concept, 2010).

En contraste, los métodos automatizados suelen ofrecer:

- Mayor repetibilidad.
- Integración con sistemas digitales de registro.
- Menores tiempos de calibración.
- Reducción de la variabilidad por manipulación humana.

CEM y CENAM recomiendan que los laboratorios avancen progresivamente hacia sistemas digitalizados para garantizar exactitud y trazabilidad robusta.

4.3 Barreras para la adopción de calibraciones periódicas

Las barreras más mencionadas fueron:

Tabla 4

Barreras para la implementación de calibraciones periódicas en empresas de Barranquilla

Barreras identificadas	Porcentaje (%)
Altos costos de calibración	40 %
Falta de personal capacitado	35 %
Resistencia al cambio	15 %
Problemas técnicos o logísticos	10 %

Nota: Elaboración propia

Estos resultados son coherentes con estudios regionales que indican que en América Latina existe una brecha metrológica estructural, caracterizada por inversiones limitadas, dependencia tecnológica externa y baja madurez en sistemas de gestión metrológica. El BID subraya que las limitaciones económicas y capacidades técnicas insuficientes constituyen los principales factores que restringen la implementación de procesos metrológicos de alta calidad (BID, 2022).

Adicionalmente, entrevistas con expertos revelaron que muchas empresas no comprenden el impacto económico que tiene la falta de calibración sobre:

- Reprocesos,
- Fallas en ensamble,
- Tiempos muertos,
- Pérdidas de productividad.

4.4 Trazabilidad y calidad metrológica: percepción de los expertos

Los expertos entrevistados coincidieron en que los mayores desafíos en la calibración de llaves dinámométricas están relacionados con:

Tabla 5

Desafíos mencionados por los expertos

Desafío	Expertos (n)
Falta de trazabilidad documental	Reportado por múltiples expertos
Ausencia de protocolos internos	Identificado como debilidad sistemática
Equipos obsoletos	Mencionado como limitante técnico recurrente

Desafío	Expertos (n)
Subestimación del impacto en seguridad	Señalado como riesgo para la seguridad industrial

Nota: Elaboración propia con base en las entrevistas realizadas a 10 expertos técnicos.

Según estos especialistas, muchas empresas dependen de la simple percepción del operario sobre el estado de la herramienta, un enfoque que contradice las mejores prácticas descritas por ISO 6789-2 (ISO, 2017b), por las guías técnicas del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, 2015) y por los procedimientos del Centro Español de Metrología (CEM, s.f.), donde se exige un modelo de gestión metrológica basado en evidencia y control sistemático de incertidumbres.

A partir de los desafíos identificados, fue posible agrupar las percepciones de los expertos en categorías temáticas, tal como se sintetiza en la Tabla 6.

Tabla 6

Categorías temáticas de los desafíos identificados por los expertos técnicos

Categoría temática	Desafío identificado por los expertos	Descripción sintética
Trazabilidad metrológica	Falta de trazabilidad documental	Ausencia de registros sistemáticos y seguimiento histórico del instrumento.
Gestión de la medición	Ausencia de protocolos internos definidos	Falta de estandarización de procesos y responsabilidades en la calibración.
Infraestructura técnica	Equipos de calibración obsoletos o sin certificación	Limitaciones tecnológicas que afectan la confiabilidad y exactitud de las mediciones.
Cultura organizacional	Subestimación del impacto de la calibración en la seguridad industrial	Baja percepción del riesgo; decisiones centradas en mantenimiento reactivo en lugar de preventivo.

Nota: Elaboración propia con base en las entrevistas realizadas a 10 expertos técnicos, mediante análisis de contenido cualitativo.

4.5 Comparación entre prácticas locales y estándares internacionales

Al confrontar los resultados obtenidos con los lineamientos internacionales, se identifican diferencias significativas tal y como se observan en la tabla 7:

Tabla 7

Comparación entre las prácticas locales y los estándares internacionales de calibración

Aspecto	Práctica en empresas de Barranquilla	Requisito según Estándares (ISO/CENAM/CEM/PTB)
Frecuencia de calibración	Predominio anual o correctiva	Definida según uso, criticidad, intensidad de operación y

Métodos utilizados	Mayormente manuales	evaluación periódica (ISO, 2017b; CENAM, 2015; CEM, s.f.) Preferencia por métodos automatizados o digitalizados con control de incertidumbre
Trazabilidad	Documentación limitada o inexistente	Registro verificable, histórico completo y respaldo de patrones trazables
Capacitación	Déficit en personal especializado	Competencia técnica certificada (ISO, 2017; PTB, 2015)
Control de incertidumbre	Nulo o básico	Obligatorio, documentado y cuantificado en cada calibración

Nota: Elaboración propia con base en los datos empíricos de la investigación y en los estándares técnicos citados en el marco teórico.

Como puede observarse, existe una brecha clara entre el estado actual y los requerimientos de los sistemas metrológicos modernos. Este hallazgo coincide con comparaciones realizadas por el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM, 2015) y por el Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM, s.f.) en estudios de intercomparación internacional, donde se ha evidenciado la necesidad de fortalecer la infraestructura metrológica en la región. Así mismo, los lineamientos internacionales destacan la necesidad de controlar las condiciones ambientales y la repetibilidad durante las calibraciones (IMEKO TC3, 2022)

4.6 Síntesis integrada de los hallazgos

La triangulación entre encuestas, entrevistas y literatura permite concluir que:

- Las prácticas de calibración en Barranquilla son heterogéneas y, en muchos casos, insuficientes.
- Existe dependencia de métodos manuales con alta variabilidad.
- La falta de trazabilidad y capacitación constituye la principal debilidad metrológica de las empresas.
- Las empresas muestran interés, pero carecen de infraestructura, recursos y cultura metrológica consolidada.
- Los resultados reflejan tendencias similares a las documentadas para América Latina, especialmente en términos de madurez metrológica y nivel de adopción tecnológica.

Estos hallazgos constituyen la base para las recomendaciones, discusión técnica y conclusiones del estudio.

5. DISCUSION

Los resultados obtenidos permiten comprender la compleja realidad metrológica que enfrentan las empresas y laboratorios de Barranquilla en la verificación y calibración de llaves dinamométricas. En términos generales, los hallazgos confirman que la región presenta un nivel de madurez metrológica intermedio, caracterizado por prácticas parcialmente alineadas con los estándares internacionales, pero afectadas por limitaciones tecnológicas, barreras

económicas y falencias en la formación técnica. Esta situación reproduce tendencias documentadas tanto en estudios europeos como en evaluaciones regionales de América Latina.

5.1 Frecuencia de calibración: brechas entre la práctica y la normativa internacional

La prevalencia de calibraciones anuales (45 %) muestra que una parte de las empresas adopta una periodicidad aceptable, aunque no necesariamente adecuada para procesos de alta criticidad. La norma ISO 6789-2 señala que la frecuencia de calibración no debe basarse únicamente en intervalos fijos, sino en factores como intensidad de uso, condiciones ambientales y evidencia de desviaciones (International Organization for Standardization [ISO], 2017b).

El hecho de que un 30 % de las empresas solo calibre “cuando la llave presenta fallas” revela un enfoque eminentemente reactivo, incompatible con la filosofía preventiva que caracteriza los sistemas modernos de gestión metrológica. Esta práctica contrasta también con los lineamientos del Centro Nacional de Metrología de México (CENAM, 2015; CENAM, 2021) y por el Centro Español de Metrología (CEM, s.f.), los cuales recomiendan calibraciones periódicas basadas en riesgo, seguimiento histórico y control estadístico. Por tanto, se evidencia una brecha entre lo que se hace y lo que debería hacerse: las empresas están calibrando para corregir problemas, no para evitarlos.

5.2 Métodos de calibración: predominio de técnicas manuales y sus implicaciones

El uso predominante de métodos manuales (60 %) refleja una dependencia histórica de equipos tradicionales y procedimientos que, aunque válidos, presentan mayores fuentes de incertidumbre. Las guías técnicas del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, 2015) y la directriz DKD-R 3-7 desarrollada conjuntamente con el Deutsche Kalibrierdienst (PTB & DKD, 2014) señalan que la participación activa del operador, la sensibilidad al alineamiento y la lectura visual aumentan la variabilidad de los resultados.

En contraste, solo el 25 % utiliza sistemas automatizados, los cuales ofrecen:

Mayor repetibilidad,
Reducción de incertidumbres sistemáticas,
Integración automática de datos,
Mejores condiciones de trazabilidad.

La literatura técnica europea y latinoamericana coincide en que la transición hacia métodos automatizados no solo mejora la calidad de la medición, sino que facilita el cumplimiento de requisitos asociados a certificaciones internacionales y a la norma ISO/IEC 17025:2017 (International Organization for Standardization [ISO], 2017). De esta manera, el predominio de métodos manuales en Barranquilla limita la calidad metrológica alcanzable y mantiene a las empresas en un nivel tecnológico por debajo de lo recomendado globalmente.

5.3 Barreras identificadas: limitaciones estructurales y culturales

Los hallazgos sobre costos, falta de personal capacitado y resistencia al cambio son coherentes con lo señalado por el BID (BID, 2022), que identifica estas barreras como elementos persistentes en la infraestructura metrológica de América Latina.

En particular:

La falta de capacitación técnica refleja carencias en la apropiación del conocimiento metrológico, incluso en empresas que realizan calibraciones regularmente.

Las limitaciones económicas dificultan la adquisición de equipos digitalizados o la contratación de laboratorios acreditados.

La resistencia al cambio evidencia la ausencia de cultura metrológica, entendida como el reconocimiento del valor estratégico de la medición confiable.

Estas barreras constituyen un círculo vicioso: sin inversión y formación, las empresas continúan dependiendo de prácticas manuales y calibraciones correctivas, aumentando el riesgo de fallas y reduciendo la competitividad.

5.4 Trazabilidad e infraestructura metrológica: un desafío regional persistente

La trazabilidad aparece como la debilidad transversal más crítica. La mayoría de empresas no llevan registros formales, no gestionan la documentación asociada al seguimiento del instrumento y no evalúan la incertidumbre de sus mediciones.

Las comparaciones técnicas realizadas por el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM, 2015) y por el Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM, s.f.), así como el informe de intercomparación SIM.M.T-S2 (Galván, Martínez & López, 2019), evidencian importantes diferencias en las capacidades de medición y en los niveles de incertidumbre alcanzados por los laboratorios participantes.

Además, el Instituto Nacional de Metrología ha señalado que la trazabilidad metrológica en Colombia aún depende, en muchos casos, de laboratorios externos, lo cual incrementa costos y limita la autonomía tecnológica (INM, s.f.).

Al integrar estos hallazgos, es claro que la falta de trazabilidad local no es un fenómeno aislado, sino parte de un problema sistémico en la región.

5.5 Comparación internacional y latinoamericana: alineación parcial con estándares

Comparando el conjunto de resultados con las normas ISO 6789-1 y ISO 6789-2 (International Organization for Standardization [ISO], 2017a, 2017b), las guías técnicas publicadas por el PTB y el comité DKD-R (PTB & DKD, 2014) y los procedimientos establecidos por el Centro Español de Metrología (CEM, s.f.) y la norma mexicana NMX-CH-6789-IMNC-2006 (Secretaría de Economía IMNC, 2006), se observa que:

- Las empresas de Barranquilla están lejos de cumplir plenamente con los requisitos técnicos establecidos en las normas ISO 6789-1 y ISO 6789-2 (International Organization for Standardization [ISO], 2017a, 2017b) en términos de control de incertidumbre, registro documental, trazabilidad y métodos de calibración.
- La región presenta características similares a otros países latinoamericanos documentados por el BID, donde la adopción de sistemas automatizados de calibración y la apropiación de cultura metrológica avanzan lentamente.
- En comparación con Europa, la diferencia más marcada se encuentra en la infraestructura: los laboratorios acreditados por el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, 2015) o por el Centro Español de Metrología (CEM, s.f.) utilizan

procedimientos altamente controlados que reducen significativamente la variabilidad en la calibración.

No obstante, también se evidencia una oportunidad significativa de mejora: las empresas que ya calibran anualmente y muestran interés en capacitar al personal constituyen el punto de partida ideal para avanzar hacia prácticas más robustas.

5.6 Interpretación integrada: hacia un modelo de madurez metrológica

La integración de resultados sugiere que Barranquilla se encuentra en un nivel intermedio de madurez metrológica, caracterizado por:

- Presencia de prácticas preventivas, aunque incompletas.
- Dependencia de métodos manuales con alto grado de variabilidad.
- Falta de trazabilidad formal y documentación sistemática.
- Brechas en capacitación técnica y apropiación de normas internacionales.
- Limitaciones económicas y culturales que restringen la modernización tecnológica.

Estas condiciones son coherentes con el diagnóstico regional presentado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2022), así como con las comparaciones técnicas reportadas por el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM, 2015) y el Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM, s.f.).

El desafío no es solamente técnico, sino organizacional: implica comprender que la calibración no es un trámite, sino un mecanismo estratégico de seguridad industrial, garantía de calidad y reducción de costos ocultos, especialmente en sectores donde el fallo de un tornillo, por ejemplo, implica riesgos reales para vidas, infraestructura y productividad.

6. CONCLUSIONES

La calibración de llaves dinamométricas constituye un componente estratégico de la seguridad industrial y de la calidad de los procesos, pero su importancia continúa subestimándose en una proporción relevante de empresas y laboratorios de Barranquilla. Los resultados evidencian que, si bien existe un grupo de organizaciones que implementa calibraciones periódicas, una fracción significativa mantiene enfoques correctivos, calibrando únicamente cuando se presentan fallas o cuando un requisito externo lo exige. Esta práctica se aparta de la filosofía preventiva consagrada en normas como ISO 6789-1 y ISO 6789-2 (International Organization for Standardization [ISO], 2017a, 2017b) y en las guías de guías técnicas emitidas por el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM, 2015) y el Centro Español de Metrología (CEM, s.f.), en las cuales la calibración es entendida como un mecanismo de gestión del riesgo y no solo de cumplimiento formal.

La predominancia de métodos manuales de calibración refleja una brecha tecnológica que limita el nivel de exactitud y repetibilidad alcanzable por las empresas. Aunque estos métodos pueden ser válidos cuando se ejecutan bajo condiciones controladas y con personal entrenado, su fuerte dependencia de la intervención humana y de variables ambientales incrementa la incertidumbre y la variabilidad de los resultados. Los hallazgos muestran que solo una minoría utiliza equipos automatizados, a pesar de la evidencia técnica que respalda su superioridad en términos de precisión, trazabilidad y gestión de datos. Esta situación reproduce las

desigualdades en infraestructura metrológica documentadas entre países de la región y laboratorios de referencia como PTB.

Las principales barreras identificadas (costo de los equipos, falta de personal capacitado y resistencia al cambio) no son únicamente problemas operativos, sino manifestaciones de una cultura metrológica aún incipiente. El análisis combinado de encuestas y entrevistas sugiere que muchas decisiones relacionadas con la calibración se toman desde lógicas de corto plazo, priorizando la reducción de gastos inmediatos sobre los costos ocultos asociados a fallas, reprocesos y riesgos en la seguridad. Esta visión limita la adopción de tecnologías automatizadas y la consolidación de sistemas de gestión de la medición alineados con los estándares internacionales.

La trazabilidad metrológica emerge como el eslabón más débil del sistema, afectando la confiabilidad de los resultados y la capacidad de las empresas para participar en cadenas de suministro exigentes. La ausencia de registros sistemáticos, históricos de calibración y estimaciones formales de incertidumbre contrasta con los requisitos de trazabilidad definidos por ISO 6789-2 y por los institutos nacionales de metrología. En un contexto donde el INM y otros organismos de la región han avanzado en el desarrollo de servicios y guías técnicas, los resultados de este estudio evidencian la necesidad de fortalecer los vínculos entre las empresas y la infraestructura metrológica disponible, con el propósito de cerrar brechas y mejorar la calidad de las mediciones en el sector productivo local.

Desde una perspectiva regional, los hallazgos en Barranquilla se alinean con los desafíos que plantea la metrología industrial identificados en América Latina, pero aportan evidencia empírica original al describir con detalle la realidad de una ciudad con alta actividad industrial. El estudio confirma la existencia de brechas en infraestructura, capacidades y cultura metrológica señaladas por el BID y otros organismos, pero además ofrece una caracterización concreta de cómo estas brechas se expresan en la práctica cotidiana de calibración de herramientas de torque. Este aporte resulta relevante tanto para el diseño de políticas públicas como para la planificación estratégica de institutos metrológicos y entidades de formación como el SENA.

En términos metodológicos, la combinación de encuestas y entrevistas demostró ser adecuada para captar la complejidad del fenómeno estudiado, integrando dimensiones técnicas, organizacionales y culturales. El enfoque mixto permitió no solo cuantificar la frecuencia, los métodos utilizados y las barreras percibidas, sino también comprender las razones subyacentes que explican las decisiones de las empresas en materia de calibración. Esta aproximación ofrece un marco replicable para estudios similares en otras regiones del país y de América Latina, y contribuye al desarrollo de investigación aplicada en metrología industrial desde contextos locales.

Finalmente, el estudio pone de manifiesto que la mejora de las prácticas de verificación y calibración de llaves dinamométricas requiere una estrategia integral que combine inversión en tecnología, fortalecimiento de la formación técnica y consolidación de políticas empresariales orientadas a la gestión del riesgo. El simple reemplazo de equipos o la contratación esporádica de servicios de calibración no resultan suficientes si no se acompaña de programas de capacitación, sensibilización y de la incorporación de la metrología como eje transversal de la gestión de la calidad. En este sentido, las conclusiones de este trabajo no solo describen un estado de situación, sino que sientan las bases para diseñar intervenciones formativas, proyectos de cooperación con institutos de metrología y futuras investigaciones que midan el

impacto real de la mejora de la calibración en la reducción de fallas, accidentes y costos en la industria.

7. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 Limitaciones

A pesar de la solidez metodológica y la riqueza de la información recopilada, este estudio presenta varias limitaciones que deben considerarse al interpretar sus resultados. En primer lugar, la muestra utilizada (50 empresas y laboratorios de Barranquilla), si bien es representativa de diversos sectores productivos, no permite generalizar los hallazgos a otras regiones del país con dinámicas industriales distintas. La infraestructura metrológica, la cultura organizacional y los niveles de tecnificación pueden variar sustancialmente según el territorio, lo cual condiciona las prácticas de verificación y calibración que aquí se analizan.

En segundo lugar, el estudio se basó en autorreportes mediante encuestas y entrevistas, lo que implica que la información depende de la percepción y sinceridad de los participantes. Si bien las entrevistas a expertos ayudaron a contrastar la información y reducir sesgos, no se realizaron observaciones directas ni auditorías técnicas sobre los equipos o procedimientos, lo que habría permitido validar empíricamente algunos aspectos críticos como la trazabilidad documental, el estado real de los instrumentos o la aplicación precisa de protocolos basados en ISO 6789-1 y 6789-2.

Otra limitación relevante es la ausencia de mediciones experimentales sobre el desempeño de las llaves dinamométricas. El estudio se centró en caracterizar las prácticas organizacionales, pero no comparó directamente los resultados de calibraciones efectuadas con métodos manuales vs. automatizados, como los utilizados en laboratorios cuya referencia técnica proviene de PTB, CENAM o CEM. Realizar ensayos comparativos habría permitido evaluar con mayor precisión el impacto de las prácticas actuales sobre la incertidumbre metrológica.

Finalmente, la investigación se circunscribe a un contexto en el que la infraestructura metrológica regional presenta limitaciones históricas, señaladas también por organismos como el BID, lo que supone que el acceso desigual a laboratorios acreditados y tecnologías avanzadas condiciona las prácticas industriales observadas. Estos factores externos no pudieron controlarse dentro del diseño metodológico

7.2 Trabajos futuros

A partir de estas limitaciones, se sugieren varias líneas de trabajo para fortalecer el conocimiento científico y técnico sobre la calibración de llaves dinamométricas en Colombia y América Latina:

- Replicar el estudio en otras ciudades y regiones, lo que permitiría construir un diagnóstico nacional sobre la madurez metrológica en el uso de herramientas de torque y su alineación con estándares internacionales.
- Realizar estudios experimentales comparativos, donde se evalúen diferencias en incertidumbre entre métodos manuales y automatizados, siguiendo protocolos basados en ISO 6789-2 y DKD-R 3-7, con el fin de cuantificar el impacto real que tiene la tecnología sobre la calidad de la medición.

- Fortalecer proyectos de intervención formativa, articulados entre el SENA, el INM y actores productivos, orientados a capacitar técnicos y operarios en buenas prácticas de calibración, documentación y trazabilidad.
- Aplicar modelos de madurez metrológica que permitan evaluar, clasificar y acompañar a las empresas en la implementación progresiva de sistemas de gestión de la medición.
- Investigar el impacto económico de la calibración periódica frente a la calibración correctiva, mediante estudios costo beneficio que evidencien los ahorros asociados a la reducción de fallas, reprocesos y riesgos operativos.
- Explorar el rol de la metrología 4.0 (automatización, registro digital, sistemas IoT aplicados al torque) como tendencia emergente para reducir la variabilidad humana y mejorar la trazabilidad en tiempo real, en concordancia con los desafíos identificados para América Latina.

En conjunto, estas líneas de investigación pueden contribuir al fortalecimiento de la cultura metrológica en la industria colombiana y latinoamericana, apoyando la mejora continua, la seguridad industrial y la competitividad global de los procesos de ensamble basados en torque

8. REFERENCIAS

Adecom. (2019). *Calibración de torque bajo lineamientos EMA e ISO*. <https://www.adecom.com.mx/en/calibracion-torque-ema/>

Adecom. (s.f.). *Calibración de par torsional (torque)*. <https://www.adecom.com.mx/en/calibracion-torque-ema/>

Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2022). *Metrología 4.0: Desafíos de la transformación digital para la metrología de América Latina y el Caribe*. [https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Metrología 4.0 Desafíos de la transformación digital para la metrología de América Latina y el Caribe es.pdf](https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Metrología%204.0%20Desafíos%20de%20la%20transformación%20digital%20para%20la%20metrología%20de%20América%20Latina%20y%20el%20Caribe.es.pdf)

Centro Español de Metrología (CEM). (s.f.). *Procedimiento de calibración de herramientas dinamométricas*. https://www.cem.es/sites/default/files/herramientas_dinamometricas_full_0.pdf

Centro Nacional de Metrología (CENAM). (2015). *Torque Metrology in Mexico, Twenty Years (IMEKO-TC3-084)*. <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC3-084.pdf>

Centro Nacional de Metrología (CENAM). (2021). *Servicios de calibración de torque*. <https://www.cenam.mx/calibracion/>

Galván, J., Martínez, F., & López, A. (2019). *SIM.M.T-S2: Supplementary bilateral comparison. Calibration of a reference torque wrench (final report)*. [https://www.researchgate.net/publication/340797291_SIMMT-S2 supplementary bilateral comparison calibration of a reference torque wrench final report](https://www.researchgate.net/publication/340797291_SIMMT-S2_supplementary_bilateral_comparison_calibration_of_a_reference_torque_wrench_final_report)

GNBS Guyana. (2020). *GNBS encourages calibration of torque wrenches and other measuring instruments*. <https://gnbsgy.org/gnbs-encourages-calibration-of-torque-wrenches-other-measuring-instruments/>

GNBS. (2020). *Calibration guidance for torque measuring instruments*. <https://gnbsgy.org/gnbs-encourages-calibration-of-torque-wrenches-other-measuring-instruments/>

IMEKO TC3. (2022). *Guide to the calibration of hydraulic torque wrenches* (IMEKO-TC3-2022-102). <https://www.imeko.org/publications/tc3-2022/IMEKO-TC3-2022-102.pdf>

IMEKO. (2015). *Intercomparison results on torque wrenches organized by the National Accreditation Service*. <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC3-084.pdf>

Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM). (s.f.). *Estrategia Nacional de Metrología*. <https://inm.gov.co/estrategia-nacional-de-metrologia/>

Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM). (s.f.). *Servicios de calibración*. <https://inm.gov.co/servicios/calibracion/>

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 6789-1:2017. Assembly tools for screws and nuts. Hand torque tools. Part 1: Requirements and methods for design conformance testing and quality conformance testing*. <https://www.iso.org/standard/62549.html>

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 6789-2:2017. Assembly tools for screws and nuts. Hand torque tools. Part 2: Requirements for calibration and determination of measurement uncertainty*. <https://www.iso.org/standard/62550.html>

Norbar. (2008). *The calculation of uncertainty of the calibration results for a torque wrench*. <https://www.norbar.com/Portals/0/BS7882%202008%20uncertainty%20paper%20.pdf>

Physikalisch-Technische Bundesanstalt. (2015). *A German calibration guideline for torque wrench calibration devices* (IMEKO-TC3-076). <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC3-076.pdf>

Physikalisch-Technische Bundesanstalt. (s.f.). *DKD Technical Committee-Torque*. <https://www.ptb.de/cms/en/metrological-services/dkd/technical-committees-within-the-dkd/10-torque.html>

PTB & DKD. (2014). *Torque calibration devices. Operating and calibration guideline*. <https://www.ptb.de/cms/en/metrological-services/dkd/technical-committees-within-the-dkd/10-torque.html>

PTB. (2020). *Static calibration of torque devices. Technical guideline*. <https://oar.ptb.de/resources/show/10.7795/550.20200825A>

SCS Concept. (2010). *Directive DAkks-DKD-R 3-7: Calibration certificate requirements*. <https://www.scsconcept.com/directive-dakks-dkd-r-3-7-2010-and-the-calibration-certificate/>

Secretaría de Economía. IMNC. (2006). *NMX-CH-6789-IMNC-2006: Herramientas de ensamble para tornillos y tuercas. Herramientas manuales de medición de par torsional*.

Requisitos y métodos de ensayo. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-ch-6789-immc-2006/>

Sumincol. (s.f.). *Calibración de torque.* <https://sumincol.net/calibracion-torque>

Tomac Tools. (2023). *How to calibrate a torque wrench for accurate fastening jobs.* <https://www.tomactools.com/es/blog/how-to-calibrate-a-torque-wrench-for-accurate-fastening-jobs>

University of Nairobi. (2014). *Torque wrench calibration and uncertainty of measurement.* <https://erepository.uonbi.ac.ke/bitstream/handle/11295/77283/Torque%20wrenches.pdf?sequence=2>