

Una Aproximación a la Aplicación del Método de Nueve Pasos de la ASM para el Análisis de Falla: Caso Medellín*

An Approach to the Application of the ASM Nine Steps Method for Failure Analysis: Medellin Case

*Juliana Ocampo Salgado**

Resumen

Este artículo incluye una aproximación al modo en que el análisis de falla es aplicado en la ciudad de Medellín por profesionales del área, en comparación con el método de los Nueve Pasos de la ASM. Se presenta un estudio de casos para validar los hallazgos mediante la confrontación entre teoría y práctica, donde se realiza una revisión bibliográfica y se recopilan testimonios dados por los profesionales a través de entrevistas. Estas acciones se desarrollan con el objetivo de identificar las buenas prácticas y las dificultades, y para determinar los recursos y capacidades usados. La investigación, en conjunto, permite establecer la forma como el método de análisis de falla es aplicado en la ciudad de Medellín y la rigurosidad de dicha aplicación, además sirve para identificar las oportunidades de mejora y los nuevos campos para futuras investigaciones. Los resultados de este estudio son valiosos, pues permiten ver el grado de madurez de los métodos aplicados en contraste con la teoría. Se encuentra limitado a la práctica desarrollada en la ciudad de Medellín y enfocado específicamente a los análisis mecánicos y metalográficos, que una vez estudiados abrieron la posibilidad de reaplicabilidad en otros campos.

Palabras clave: método de análisis de falla, análisis de riesgos, análisis de causa raíz, causa más probable de falla.

* Investigación para optar al título de Magíster en Administración de Riesgos. Escuela de Administración. Universidad EAFIT.

** Ingeniera Mecánica. Universidad Autónoma de Manizales. Correo electrónico: jocamp23@eafit.edu.co

Abstract

This paper includes an approach of the way that failure analysis is performed in Medellin city, by professionals in this field, in comparison with the Nine Steps Methodology proposed by ASM. A case of study was carried out to validate findings through the confrontation between theory and practice, where a biographic review was performed and testimonies were collected through interviews. These actions made possible to identify good practices, difficulties and determine the resources and capacities used. The whole investigation allowed establishing the way in which the method of fault analysis is applied in Medellin city, its rigor, identifying improvement's opportunities and new fields for future investigations. The findings of this research are valuable because allow to identify the maturity grade of the methodologies that are applied in contrast with the theory. It is limited to the practice applied in Medellin City to mechanical and metallurgical fields, that once where studied; they opened the possibility of been re-applied to other fields.

Keywords: failure analysis methodology, risk analysis, root cause analysis, most probable cause of failure.

Aspectos relevantes:

- Costeo de la falla.
- Procedimiento para actuar ante una falla o siniestro.
- Madurez de método aplicado.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de falla tiene sus orígenes en la ingeniería, donde es usado para la identificación de la(s) causa(s) más probable(s) de falla [1] [2]. La falla es un hecho de la vida que acontece en cualquier campo donde se desenvuelve la humanidad y que tiene implicaciones a nivel económico y social [3]. Las fallas pueden ocurrir en distintas partes, desde aquellas que afectan a una sola persona hasta las que resultan en una devastación total, con daños extensivos que pueden afectar a toda una comunidad [3].

La ingeniería de materiales ha logrado establecer métodos para el análisis de las fallas que suceden en este campo específico, uno de ellos es el de los Nueve Pasos, propuesto por la Sociedad Americana de Materiales (American Society of Materials – ASM) [1], con el fin de identificar la(s) causa(s) más probable(s) de falla.

En la medida en que encontrar la causa de una falla implica el hallazgo de un responsable [1] es relevante entender cómo se llega a ese veredicto para poder determinar la validez del dictamen [4].

El objetivo de este estudio es comprender la forma en que el análisis de falla es realizado en la ciudad de Medellín, en comparación con el método teórico de los Nueve Pasos de la

ASM. La investigación no se centra en las pruebas y los análisis metalográficos, químicos o físicos realizados a las piezas falladas, sino en evidenciar el procedimiento general de análisis de falla aplicado a través de entrevistas hechas a profesionales del área en cuestión, con el fin de identificar las buenas prácticas, la frecuencia con la que es usado en el medio, las áreas en que es aplicado, las dificultades, los errores y las capacidades y recursos que se tienen para su aplicación.

La comparación entre la forma como se realiza el análisis de falla con el método teórico permite establecer oportunidades de mejoramiento y fortalecimiento del análisis de falla en la ciudad.

Esta investigación consta de cinco apartados. A continuación, se encuentra el primero, el marco de referencia en donde se muestran las diferentes definiciones y conceptos del análisis de falla; posteriormente se presenta la metodología de investigación desarrollada y los resultados de las entrevistas realizadas, para culminar con la discusión y las conclusiones.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Definiciones

La falla es un hecho de vida [5]. No puede ser totalmente evitada. Un sistema libre de falla es inalcanzable o prohibitivamente caro, sin embargo, si una falla ocurre y se realiza un análisis sistemático de ella se pueden obtener grandes lecciones, lo que permite el beneficio de muchos a través del infortunio de unos pocos [3]. Una falla es un evento o condición en la cual un componente, máquina, proceso o estructura es incapaz de funcionar de la forma en la que fue prevista, y es un hecho que se considera inaceptable pues no puede continuar desempeñando su función de manera segura, fiable o económica [3] [2] [6]. También se define como falla, en procesos de manufactura, al incumplimiento de especificaciones en un componente [7].

Existen dos categorías de falla. Cuando la falla es en la función o cuando la falla es en el rendimiento esperado [8]. La ASM [9] define que existen diferentes niveles de falla:

- Primer nivel: “Pérdida de la función”, cuando el componente opera pero no efectúa la función para la cual fue diseñado.
- Segundo nivel: “Pérdida de vida útil”, cuando el componente cumple con su función pero su operación es poco fiable o insegura.
- Tercer nivel: “Inoperable”, cuando la falla es tan severa que el componente ni opera ni cumple con su función.

La Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC) 50(191) [10] define la falla como: “el evento en el cual una función requerida es terminada excediendo los límites de desviación

del desempeño o de la función deseada”. Define el error como: “la condición de desviación aceptada entre los límites del desempeño deseado”, y la falta como “el estado de un componente caracterizado por la inhabilidad para cumplir la función para lo cual es requerido”.

Por lo anterior, la falta resulta de la falla y el modo de falla es una descripción de la falta; es decir, que es más apropiado hablar de los modos de falta que de modos de falla, y aunque ambos términos son comúnmente aceptados se debe aclarar que la técnica de análisis de modos de falla y efectos (Failure Modes and Effect - FMEA) analiza las faltas de un sistema [11]. Cada función de un componente puede tener varios modos de falla, es por eso que, aunque se identifiquen todas las funciones de un componente, quizá no sea posible identificar todos los modos de falla [11].

El Estándar Británico BS 5760, Parte 5, define el modo de falla o falta como “el efecto por el cual la falla es observada en un ítem fallado [12]”. En una definición más específica, se tiene que el modo de falla es aquel que relata cómo el material falló, y si se analiza de forma correcta el mecanismo de falla corresponderá con la(s) causa(s). Si el mecanismo no está bien identificado las causas reales no serán identificadas y no se podrán tomar medidas correctivas que sean eficientes [2].

El árbol de falla es un método que permite analizar la confiabilidad y la seguridad de un sistema, difiere del FMEA porque en este caso está restringido a identificar elementos del sistema y eventos que puedan desencadenar un suceso en particular no deseado [13].

Un elemento de la falla es el “indicador” [2], que se refiere a los precursores y síntomas de las fallas [2], el cual difiere del modo de falla que está asociado a “un solo evento que causa una falla funcional” [14].

La causa de falla, por su parte, está definida como las condiciones durante el diseño, la fabricación o el uso que llevaron a la falla [10].

Dentro de las causas se tiene el concepto de causa raíz y causa más probable de falla. Se deben diferenciar ambas. La causa raíz es considerada como la(s) causa(s) identificada(s) por la(s) cual(es) es posible determinar las medidas correctivas a tomar [11], mientras que la segunda está definida como la(s) causa(s) principal(es) de la fallas, las cuales pueden no siempre ser reconocidas con plena certeza, pero para las que el investigador podría definir su mayor probabilidad, identificando los hallazgos y tomando como base los hechos demostrados, desde las conclusiones fundamentadas en conjeturas [15].

2.2. El Análisis de Falla

El análisis de falla es realizado para identificar las causas de falla con el objetivo de no repetir las similares (ya que el análisis de las evidencias físicas por si solo puede no ser adecuado para lograr el objetivo) y puede, pero no obligatoriamente, llevar a una causa

fundamental que sea corregible; en este caso no sería una causa raíz [16] [17]. Muchas veces el análisis termina identificando, incorrectamente, el mecanismo de falla y quizá las causales que influenciaron. [2] El Análisis de la Causa Raíz (Root-Cause Analysis-RCA), por su parte, tiene como objetivo el claro entendimiento de causa raíz para disminuir la ocurrencia de la falla [6] [17], ya que permite identificar las acciones correctivas adecuadas que deben ser tomadas [2], es decir, que se asocia la causa raíz con una causa corregible y la causa más probable con los hechos.

El análisis de falla ha probado ser una disciplina para identificar la raíz física de las fallas. El análisis de la causa raíz abarca otras de las contribuciones a las fallas, como son las humanas y las causas fundamentales latentes [2]. Sin embargo, este punto es discutible al revisar los planteamientos del análisis, donde se enuncia que un procedimiento “tipo receta” [7] puede no ser suficiente para un análisis que requiere tener la mente abierta. Aunque las fallas que se investigan son físicas, debido a que estas ocurren en varios niveles, no deben ser vistas como un solo evento. La falla y el análisis de falla requieren ser explorados de diversas formas [7].

Un análisis de falla y un análisis de causa raíz conducidos de forma correcta son los pasos críticos en el curso de la solución de problemas y la clave para hallar correctivos y medidas preventivas que vayan en procura de una mayor calidad y fiabilidad [2]. Según lo anterior, ambos métodos son complementarios [18].

El análisis de falla es un procedimiento de investigación que se realiza de forma sistemática usando el método científico, para localizar las causas de la falla. Se habla de “Ingeniería Forense” como un sinónimo, pero en realidad se trata más de un “proceso de investigación basada en litigios” [1]. El análisis de falla hace parte integral de los diseños y de los procesos de manufactura proporcionando mejoras y previniendo fallas catastróficas [1].

El análisis de falla permite determinar las causas o factores que llevan a una indeseable pérdida de funcionalidad y a prevenir la recurrencia de la falla [7]. Hay diferentes tipos de análisis de falla, de acuerdo con la pérdida que pueden generar. Se clasifican en “directas” e “indirectas” [19]:

- Las directas están relacionadas con el daño de productos, el costo de reparación, el costo de las medidas preventivas y el costo de las compensaciones debido a accidentes que ocurren como consecuencia de la falla [19]. Algunos accidentes pueden generar daños a personas o a vecinos, en este caso el análisis de falla sirve para determinar la responsabilidad sobre el evento indeseado [7].
- Las indirectas incluyen los costos por disminución de la producción, disminución de la moral y los daños a la imagen de las empresas [19].

Por lo anterior, debido a la relevancia que podría tener una falla, es necesario realizar análisis, incluso a las fallas menores, de manera minuciosa, en lugar de solo hacer reparaciones y, en caso de que la investigación pueda contribuir a la sociedad, es importante hacer públicos los resultados [19].

2.3. Método de Análisis de Falla Nueve- Pasos Propuestos por ASM [8] [20]

El análisis de falla es una actividad multidisciplinaria, el enfoque del análisis y el método adoptado dependen de la experiencia del analista. Un solo analista puede no tener todo el conocimiento de varias disciplinas, que podría ser necesario para la evaluación y análisis de un caso en particular de falla o accidente, y, en este caso, un trabajo en equipo puede ser siempre deseable para llegar a una correcta solución del problema [3].

A continuación, se incluyen algunas generalidades del método de análisis de falla propuesto por la ASM para que una organización realice un buen análisis de falla. Para mayor información sobre cada aspecto que cubre el método véase Dennies [20] y [8].

- 1) *Entender y negociar los objetivos de la investigación, para ello se debe establecer:* la prioridad de la investigación, los recursos disponibles, las restricciones impuestas y el objetivo u objetivos de la investigación.
- 2) *Obtener un claro entendimiento de la falla:* definir cuál es el problema, qué sucedió y por qué razón se está realizando el análisis. Posteriormente, adquirir la mayor información y conocimiento sobre el equipo o componente que falló. Una buena herramienta en este caso es un ejercicio de lluvia de ideas con las personas implicadas con el equipo o componente que falló. Adquirir toda la documentación posible y todos los registros históricos de operación y de fabricación. Tener en mente que en los detalles están muchas veces las respuestas y por eso se debe ser riguroso en todos los aspectos de la investigación.

Documentar el escenario de falla: si no es posible visitar la escena de la falla se deben solicitar dibujos, esquemas o fotografías, muchas veces de antes y después; esto puede resultar de gran ayuda. Si puede visitar la escena tomar registros fotográficos, tantos como sea posible, y video. Llevar a campo las herramientas necesarias para tomar la mayor cantidad de datos que puedan ser importantes.

Solicitar declaraciones de testigos o reporte de incidentes.

Entrevistar a los testigos.

Congelar la evidencia: un ingeniero de fallas que pueda terminar en algún proceso legal debe estar atento a las regulaciones locales que se deben seguir, concernientes al manejo de evidencias y a las pruebas.

- 3) *Identificar objetiva y claramente todas las posibles causas raíz:* existen muchas herramientas que pueden ser usadas en las investigaciones de falla, una muy común es

el árbol de falla con lluvia de ideas mediante ejercicio de “¿Por qué?, ¿Por qué?, ¿Por qué?”. El árbol de falla permite hacer un registro de todas las posibles causas raíz y la lluvia de ideas permite identificarlas.

- 4) *Evaluar de manera objetiva la probabilidad de cada causa raíz*: priorizar las causas de falla: una buena herramienta para este paso es el análisis de modos de falla (FMA). El árbol de fallas proporciona todas las causas y el esquema de FMA ayuda a decidir cuál es el curso de la acción a tomar. Es importante ser selectivo y subjetivo al asignar a cada causa raíz la probabilidad; lo mejor en estos casos es apoyarse en la experiencia del equipo de análisis y determinar cuáles causas de falla se pueden intentar comprobar o refutar primero. Posteriormente, asignar la prioridad teniendo en cuenta los recursos disponibles, el tiempo y los exámenes y pruebas necesarias para ello. Considerar que la secuencia de exámenes seleccionados no contamine algún examen que se requiera hacer luego. Documentar el análisis de probabilidad y priorización realizado en este paso, ya que con el tiempo el motivo del orden dado puede ser olvidado.
- 5) *Converger en la(s) causa(s) raíz más probable(s)*: elaborar el Plan Técnico (Technical Plan Resolution – TPR [20]) pues este sirve para planear la forma técnica y sistemática en la que se puede probar o rechazar una causa raíz; además, sirve como un mapa de ruta para sacar el mejor provecho de los análisis, las pruebas y los exámenes realizados. También para decidir qué acciones se pueden realizar de forma consecutiva y cuáles de forma paralela teniendo en consideración el tiempo y los recursos disponibles.

La realización del trabajo sistemático planeado irá probando o rechazando las causas raíces planteadas hasta llegar a las más probables. Se deben documentar todos los resultados y la forma como se llegó a las conclusiones del análisis de la información.

Muchas veces no se puede concluir con certeza la(s) causa(s) de la falla. Entonces, el analista debe determinar la más probable y hacer una distinción entre los hallazgos, basado en las conclusiones extraídas de las conjeturas [20].

- 6) *Identificar clara y objetivamente todas las posibles acciones correctivas*: consiste en repetir el paso tres de los nueve del análisis de falla, solo que en este caso el objetivo es identificar las posibles acciones correctivas para solucionar las causas raíces más probables identificadas. Este paso también se puede trabajar a través del árbol de fallas, pero sería un “árbol de acciones correctivas” [20] y se conduciría su análisis de igual forma que lo enunciado en el paso tres.
- 7) *Evaluar de forma objetiva cada acción correctiva*: para este paso se repite el paso número cuatro de los nueve del análisis de falla. La diferencia es que, en este caso, el equipo de trabajo se centra en generar una evaluación de la acción correctiva (Corrective Action Assessment – CAA [20]) para asignar a cada acción la probabilidad de que resuelva la(s) causa(s) raíz más probable(s) identificada(s) y establecer la

prioridad en que cada acción correctiva debe ser ejecutada. Todo lo anterior, teniendo en cuenta que sea técnicamente posible, económico y que se pueda realizar a tiempo.

- 8) *Seleccionar la(s) acción(es) correctiva(s)*: es en esencia repetir el paso cinco de los nueve del análisis de falla, pero enfocado en que permita seleccionar la(s) acción(es) correctiva(s) óptima(s), siguiendo las mismas acciones del paso cinco que generan un plan de evaluación (Technical Plan of Evaluation - TPE).
- 9) *Evaluar la efectividad de la(s) acción(es) correctiva(s) seleccionada(s)*: por último, después de un periodo de tiempo, cuando las acciones correctivas sean ejecutadas, se deben evaluar para comprobar su eficiencia. La forma en que se valoran debe permitir probar la acción correctiva. La periodicidad de la evaluación se deja a discreción del equipo de análisis.

2.4. Importancia del Análisis de Falla

Las fallas en componentes y en estructuras en servicio han ido en aumento en varias industrias, y muchas veces sin ninguna advertencia. Algunas fallas son triviales, pero otras tienen grandes repercusiones, esto incluye: muertes, heridos, daños a propiedad, pérdidas de producción, paro total de planta, problemas ecológicos y litigios largos y caros que afectan la credibilidad de los fabricantes y la confiabilidad en sus productos [3]. Las fallas asignan responsabilidad. Descubrir la causa raíz ayudará a decidir la culpabilidad de las partes implicadas [1]. En consecuencia, las fallas repercuten en la sociedad y en la economía [3].

El análisis de falla y la implementación de las medidas preventivas han hecho mejoras significativas a la calidad de los productos y sistemas. Lo que demuestra la relevancia de este método y una valoración del aseguramiento de la calidad y de las expectativas de los usuarios [2]. En la actualidad, el análisis de falla es empleado y formalizado como un método de prevención de fallas, es decir, que el método ha evolucionado y ha madurado [2].

El análisis de falla tiene una relación con los riesgos, aunque es una actividad que se realiza una vez un riesgo se ha materializado. Este ejercicio es importante dentro del proceso de administración de los riesgos, ya que la experiencia es uno de los medios por los cuales se obtiene aprendizaje [3] y permite identificar una situación o circunstancia como un riesgo y tener claridad sobre la correcta identificación de las causas. Esto lleva a determinar medidas de acción correctivas que prevengan la ocurrencia de la misma falla [1], es decir, un tratamiento efectivo de los riesgos.

“La importancia y el valor del análisis de falla en la seguridad, confiabilidad, desempeño y economía está bien documentada” [2]. El análisis es esencial, aunque no suele ser enfatizado en los planes de estudios de ingeniería y, por ende, los métodos de análisis de falla y las técnicas no son siempre entendidas por muchos ingenieros [1].

Luego, el aporte de esta investigación es identificar el modo en que el análisis de falla es realizado en la ciudad de Medellín por profesionales del área. La intención no es criticar, sino por el contrario, al compararlo con un método definido por una institución internacional detectar las buenas prácticas, las dificultades, los recursos y capacidades que se tienen para realizar este tipo de análisis en la ciudad y definir las oportunidades de mejora que pueden existir.

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el modelo de estudio de casos, que es una “estrategia de investigación” [21] en la cual, incluyendo uno o más casos, se construyen teorías, propuestas o teorías intermedias [22]. Este último concepto es el que mejor se acopló al propósito de entender la forma en que el análisis de falla es aplicado en la ciudad de Medellín, en contraste con la teoría existente del método.

El enfoque de esta investigación es cualitativo, pues busca comprender los vínculos entre la información existente del método de análisis de falla de los nueve pasos propuestos por la ASM y la aplicación, desde la visión de los actores implicados [23]. Como el estudio tiene la finalidad de investigar el comportamiento y desempeño de las organizaciones mediante el estudio de casos es descriptivo [24].

Por la naturaleza de la investigación, fue necesario el uso de la lógica de replicación [22], donde se seleccionan múltiples casos para ser analizados. La selección fue hecha mediante el establecimiento de características comunes y se utilizó un “muestreo progresivo” basado en la dinámica de los hallazgos de la investigación [25].

La característica común seleccionada fue la de profesionales que aplican o hayan aplicado por más de veinte años el método de análisis de falla (método de los nueve pasos de la ASM), ya sea que ofrezcan este servicio a terceros o sea un servicio interno de una institución. Los tipos de instituciones escogidas fueron dos universidades y tres empresas de ingeniería que constituyeron la fuente “primaria y oral”, con su aporte desde la perspectiva de la aplicación del método [25]. Por temas de confidencialidad los profesionales se identificaron de la siguiente manera:

Tabla 1. Profesionales entrevistados

Profesional	Años de experiencia en análisis de falla	Universidad	Empresa de ingeniería
A	37		x
B	40	x	x
C	23		x
D	42		x
E	20	x	

La técnica de recolección de información y registro aplicada fue la entrevista (protocolo de entrevista) abierta - semiestructurada. Se basó en una guía de variables relacionada con la aplicación del método y preguntas sobre sus áreas de aplicación, la frecuencia de uso, el modo de aplicación, los errores comunes, la eficacia, los recursos necesarios, entre otras variables que se pudieron ampliar para dar precisión a los conceptos que se deseaban lograr o para obtener mayor información [26] sobre la aplicación del método. Se grabaron las entrevistas y se transcribieron como herramientas de registro de la información, la cual luego fue codificada de acuerdo a las variables analizadas para ser sistematizada y, posteriormente, realizar su análisis y obtener los resultados.

Las entrevistas se realizaron en el periodo comprendido entre octubre de 2016 y enero de 2017. Los profesionales entrevistados son ingenieros mecánicos o metalúrgicos, personas que llevan más de veinte años realizando y acompañando el análisis de falla. Cuatro de los profesionales tuvieron contacto por primera vez con el análisis de falla desde que estaban en la universidad, donde iniciaron el servicio por solicitud de la industria. El quinto llegó a la aplicación porque el medio necesitaba un profesional para hacer este tipo de investigaciones y, debido a que tenía experiencia en materiales y en diseño mecánico, se vio en la obligación de cumplir con esta tarea. Desde entonces, cada uno de ellos ha realizado y ha participado en gran variedad de análisis. Uno de los entrevistados ya se encuentra retirado, pero aún es una fuente continua de consulta para los demás y para el medio que lo reconoce como una autoridad en el tema en la ciudad.

La forma en que el método de análisis de falla es aplicado en la ciudad de Medellín es la conjetura emergente que surge de los patrones de las relaciones entre “los constructos” de cada caso y entre los casos y sus “argumentos lógicos subyacentes” [22]. Esto permite encontrar las similitudes y diferencias en las buenas prácticas, en las dificultades y en las demás variables del método que fueron analizadas, como se puede ver en el apartado tres, y, luego de la comparación con la literatura, propicia la observación de los aportes de esta investigación, como se podrá ver en el apartado cuatro.

4. RESULTADOS

Este apartado presenta los resultados del estudio realizado a profesionales del análisis de falla. Para esto se incluyen cada una de las variables que fueron consideradas para la entrevista, basadas en la revisión del marco teórico de la investigación y sobre las cuales se fundamentaron las preguntas realizadas.

4.1. Áreas de Aplicación del Método y Frecuencia de Uso

Los cinco profesionales concuerdan que para la cantidad de fallas que existen, muy pocas veces se realiza un análisis de falla. La razón de la baja frecuencia de uso manifestada por ellos se establecen la siguiente tabla.

Tabla 2. Razones de baja frecuencia de uso

Razones manifestadas por los profesionales para la baja frecuencia del análisis de falla	PROFESIONAL				
	A	B	C	D	E
Poca valoración del costo beneficio del análisis de falla	x	x	x	x	x
Falta de conciencia	x		x	x	x
Ignorancia. No existen en la industria procedimientos para el manejo de un siniestro				x	
Falta de cultura. No se considera el análisis de falla como un recurso	x		x	x	x
Las empresas se acostumbran a vivir con las fallas	x	x	x	x	x

El profesional C declaró que los análisis de falla están enfocados a los procesos de reclamación con las aseguradoras, a obtener los soportes para demostrar que los daños son fortuitos. El profesional D manifestó que solo se usa cuando “hay problemas muy grandes” donde existe una demanda de por medio o incluye reclamaciones de orden civil. De igual manera, el profesional E agregó a lo anterior que se usa en la industria aeronáutica, donde por ley se debe determinar lo que sucedió y sus causas, y declaró que es una práctica que debería ser obligatoria en todas las industrias.

Los profesionales A, B y C señalaron que las empresas que toman conciencia hacen análisis de falla con mucha frecuencia y tienen registros e información que sirve de ayuda.

Es de opinión general de los profesionales entrevistados que por lo común, cuando una pieza falla, la botan, la reparan o la reemplazan sin saber qué sucedió o las razones por las que falló. Las empresas prefieren mantener repuestos y estar cambiando piezas que averiguar la causa de la falla del elemento, sin considerar que el costo asociado no es solo el de la pieza, sino también de los tiempos de paro de operación, costos de reparación, costos de vida (seguridad de las personas) y otros que no se tienen en cuenta.

4.2. Método de los Nueve Pasos

Como primer paso para determinar el método usado por los profesionales se indagó sobre el origen de los conocimientos que se tienen sobre el método aplicado por cada uno. La Tabla 3 muestra los resultados.

Tabla 3. Origen del método que se aplica para el análisis de falla

Origen del método que aplica	PROFESIONAL				
	A	B	C	D	E
Conocimientos previos y estudio de literatura de métodos de análisis de falla	x	x		x	x
Conocimiento heredado de alguien con mayor		x	x		

experiencia					
Método depurado a través de la practica (experiencia)	x		x	x	
Contacto con la ASM		x			x
Estudio de información en internet	x	x	x		x
Comparación con métodos usados por otros y validación de resultados con otros investigadores		x	x		

Los profesionales B, C, D y E manifestaron que cada evento es distinto, “es un mundo nuevo”. El profesional A declaró que algunos libros proponen derroteros o una secuencia de lo que se debe hacer. El profesional C no ha estudiado específicamente un método, aplica lo que le enseñaron y lo confronta con los demás estudios que se realizan a nivel mundial. El profesional D sabe que existen métodos, pero lo que él aplica “es un proceso analítico”, un “proceso lógico” basado en la experiencia, al igual que los profesionales A y C.

A continuación, de acuerdo con los comentarios establecidos por cada profesional sobre el método aplicado, se indican cuáles pasos corresponden al método de los nueve pasos propuesto por la ASM.

Tabla 4. Método aplicado por cada profesional en contraste con los nueve pasos de la ASM

Método aplicado comparado con los nueve pasos propuestos por la ASM	PROFESIONAL				
	A	B	C	D	E
1. Entender y negociar los objetivos de la investigación, para ello se debe establecer	x		x	x	x
2. Obtener un claro entendimiento de la falla	x	x	x	x	x
3. Identificar objetiva y claramente todas las posibles causas raíz	x	x	x	x	x
4. Evaluar de manera objetiva la probabilidad de cada causa raíz	x	x	x	x	x
5. Converger en la(s) causa(s) raíz más probable(s):	x	x	x	x	x
6. Identificar clara y objetivamente todas las posibles acciones correctivas	x	x		x	
7. Evaluar de forma objetiva cada acción correctiva	x				
8. Selección de la(s) acción(es) correctiva(s)	x	x	x	x	x
9. Evaluar la efectividad de la(s) acción(es) correctiva(s) seleccionada(s)	x				

El profesional E manifestó que, aunque los manuales de la ASM son “la biblia del análisis de falla” en muchos casos el método no puede ser aplicado tal cual, debido a que se encuentra muy relacionado con la historia del equipo y muchas veces no hay registros de operación y mantenimiento que incluyan esa información. El profesional agrega que la aplicación del método también requiere hacer el levantamiento en campo de la información del equipo, pero esta actividad es casi imposible, ya que es más común que el cliente entregue una pieza oxidada y sucia mucho tiempo después de la falla y que el analista debe trabajar con esos recursos limitados, pues esta acción hace que se pierdan evidencias que de otra forma se podrían recolectar en el sitio de la falla. La misma opinión fue mencionada por los profesionales A y B.

Los profesionales C, D y E aclararon que un paso importante previo es el de la conservación de las muestras o de las piezas que fallaron. Su manipulación puede afectar el resultado de los análisis y, por lo tanto, las empresas deben contar con procedimientos para el manejo de las fallas.

Ninguno de los profesionales mencionó hacer uso de alguna de las herramientas de apoyo como el análisis de causa raíz, el análisis de modos de fallas o las recomendadas por la ASM para la trazabilidad de la investigación.

4.3. Eficacia del Método de Análisis de Falla

Todos los profesionales expresaron que aplicar el análisis de falla es eficiente, y que muy pocas veces no llegaron a identificar la falla con un nivel de certeza alto. El profesional A mencionó que la eficacia va de la mano de la información recopilada. Si hay buenos datos, el mayor número de ensayos posibles y el tiempo suficiente para reunir y analizar la información se genera una mayor condición de certeza. El profesional E mencionó que el método en sí da una solución efectiva en una proporción 50-50, porque el conocimiento, la experiencia y un poco de intuición tienen mayor relevancia; los métodos son solo una guía para aquellos que recién están iniciando la práctica.

4.4. Reaplicabilidad del Método en Otras Áreas

De acuerdo con lo observado por los cinco profesionales el análisis de falla, al ser un proceso analítico basado en el método científico, podría ser reaplicado prácticamente a cualquier campo, como: fallas de producción o de proceso, el accidente de una persona, sistemas de control, un derrumbe, otros tipos de materiales distintos a los metálicos y en mantenimiento.

El profesional D manifestó que se podría aplicar en “todos los eventos que implican destrucción, pérdida de valor o situaciones por fuera de lo esperado”, pero que para ello se

debe propender a establecer un método en general que incluya un componente analítico como un elemento esencial que sustente las conclusiones y la argumentación que se da en torno a la falla, bien sea para explicar la posible causa o para hacer correcciones.

4.5. Causa más Probable de Falla versus Modos de Falla

Es de opinión general de los entrevistados que ambos conceptos son distintos. Los profesionales A y E hicieron un ejemplo al respecto. El A con el modo de falla corrosión y el B con el modo de falla fatiga, pero, ¿qué generó esa corrosión o esa fatiga? La causa es el motivo. El profesional B manifestó que “después de entender el modo de falla se pueden plantear todos los escenarios que lo pueden generar y cuál fue el que lo generó”. El profesional C opinó que “el modo de falla es una guía para encontrar la causa de la falla”. El profesional D mencionó que el modo está relacionado con cómo falló un material, la morfología de la falla y la secuencia probable en que ocurrió la falla; por lo tanto, el modo es el que lleva a la causa. Y agregó que se puede entender el modo, pero no determinar la causa. El modo es un elemento fundamental pero no necesariamente es concluyente.

4.6. Errores más Comunes en la Aplicación del Análisis de Falla y los Factores de Desviación

En la siguiente tabla se enumeran los errores más comunes al hacer un análisis de falla y los factores de desviación que pueden influenciar sobre el resultado, según la opinión de los profesionales entrevistados.

Tabla 5. Errores y factores de desviación

Errores	PROFESIONAL				
	A	B	C	D	E
Exceso de confianza		x			
Problemas de comunicación. Distinto nivel técnico, deficiente comunicación entre las partes		x		x	
Hace análisis en una sola vía			x	x	x
Falta de conocimiento de los recursos disponibles	x				
No tener en cuenta el aspecto dimensional					x
Factores de desviación					
Falta de información en los antecedentes	x	x	x	x	x
No tener la posibilidad de ver la pieza que falló en el lugar donde falló		x		x	x
Falta de información en las variables operacionales		x	x		
Información errónea o falsa		x	x	x	
Temas éticos – influencia de las partes interesadas	x	x	x	x	x
Falta de tiempo	x		x		
Limitación de los recursos económicos	x		x		

El profesional D afirmó que “todo proceso de análisis es susceptible a estar equivocado” y sugiere que el análisis realizado se haga por varias vías, debido a la delicadeza del problema de falla. Sobre los factores de desviación resaltó la importancia de conservar, ante un siniestro, los componentes hallados sin ninguna intervención, ya que una acción de manipulación, limpieza, o cualquier otra, puede afectar el procedimiento de detección de la posible causa.

El profesional A dijo que es mejor abstenerse de realizar un análisis si se percibe que parte de la información es retenida, pues esto sugiere que no hay calidad y no hay confianza para realizar el proceso. A lo cual el profesional C comentó que cuando se presta un servicio el que contrata el servicio quiere que el resultado surja a su favor. El profesional E, por su parte, mencionó que en caso de reclamaciones los actores son el asegurado, el seguro y los ajustadores, que en ocasiones cada una de las partes, por su lado, presionan, ya que existe un interés por determinar sobre quién recae la responsabilidad. Pero él no permite eso, ni ningún tipo de soborno.

4.7. Dificultades para la Aplicación del Análisis de Falla

Las siguientes son las dificultades que enfrentan los entrevistados cuando realizan un análisis de falla:

Tabla 6. Dificultades

Dificultades	PROFESIONAL				
	A	B	C	D	E
Falta de información		x	x		x
Existen recursos, pero hay poca disponibilidad			x		
Procesos muy indefinidos				x	
Falta de tiempo	x				x
Pieza que falla sin cuidado adecuado			x	x	x
Posibilidad de ver pieza que falló en campo		x		x	x

Los profesionales B, C, y E mencionaron que lo más difícil es que las empresas tengan récords históricos de la operación y del mantenimiento de los equipos.

4.8. Recursos con los que Debe Contar una Empresa para Aplicar el Método

Tabla 7. Recursos

Recursos para el análisis de falla	PROFESIONAL				
	A	B	C	D	E

Ensayos y pruebas					
Los laboratorios en la ciudad para hacer los ensayos	x	x	x	x	x
Son suficientes los equipos para ensayo disponibles	No		No		No
Modelación y simulación	x	x		x	
Analista de falla					
Medios de referencia disponibles					
Internet (comunicaciones)	x	x	x		
Universidades	x		x		x
Especialistas en diversas áreas	x	x		x	
Hay especialistas con quien consultar	x	x	x	x	x
Entidades en el exterior	x				
Conocimientos	x	x	x	x	x
Empresas					
Llevar registros de operación y mantenimiento					
Cultura de falla, políticas de manejo de fallas, procedimientos para el manejo de fallas	x	x	x		x
Cadena de apoyo con universidades y laboratorios	x			x	
Tiempo	x	x	x	x	x

Profesional A: el éxito del análisis de falla va muy de la mano de las herramientas que se puedan tener. Por su parte el profesional D mencionó que “el recurso va muy de la mano con la iniciativa”.

Todos los entrevistados manifestaron que en la ciudad se cuenta con laboratorios, universidades y especialistas suficientes para realizar el análisis de falla.

A, C y E declararon que, aunque los recursos existen son insuficientes, en ocasiones, pues se requieren largos periodos de espera para acceder a ciertas pruebas que están copadas.

4.9. Idoneidad del Profesional Líder en Análisis de Falla

Según los conocimientos de los entrevistados no existe una norma o ley que rija la práctica del análisis de falla ni un proceso de calificación por alguna autoridad en el país.

El profesional líder en análisis de falla, según la opinión de los entrevistados, debe tener las siguientes capacidades, aptitudes, actitudes y habilidades:

Tabla 8. Características de los líderes en análisis de falla

Características de los líderes en análisis de falla	PROFESIONAL				
	A	B	C	D	E
Poseer conocimientos en materiales	x	x	x	x	x
Sentido común			x		x

Experiencia y liderazgo	X	X	X	X	X
Mente abierta. Creatividad. Imaginación. Realista		X	X	X	X
Ético: ser transparente. Honesto. Responsable	X	X	X	X	X
Estudioso. Documentarse bien		X	X	X	X
No tomarse confianza debido a la experiencia		X			
Disciplinado en seguir todos los pasos		X			
Despojarse de prejuicios		X			
Analítico		X		X	X
Con vocación		X			
Espíritu investigativo				X	X
Perspicacia					X

El profesional B subrayó que: “Se requiere más que todo vocación por la responsabilidad que se adquiere”. El profesional D manifestó que si no hay expertos en un tema la responsabilidad del analista es estudiar al respecto.

Todos los entrevistados expresaron que no existe una regulación que exija algún tipo de certificación para el profesional que realiza el análisis de falla. El entrevistado D declaró que la exigencia de una certificación debe depender de la magnitud de la falla, que es más importante por ahora generar cultura.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De acuerdo con la opinión de los profesionales entrevistados el análisis de falla es subvalorado por parte de la industria en general, sin embargo, la teoría muestra cuán importante es. Por lo tanto, surgen las siguientes preguntas: ¿será este fenómeno producto de una evaluación inadecuada de los costos de la falla y su impacto? A la hora de hacer una evaluación de los costos generados por una falla, ¿se tendrán en cuenta los costos de las pérdidas tanto directas¹ como las indirectas²?

Con base en la información recopilada se podría deducir que si el coste de las consecuencias de la falla es inadecuado el costo-beneficio de realizar un análisis de falla no sería evidente y, por tal motivo, las empresas no tendrían interés en invertir en este tipo de análisis. Esto conduciría a no ser una práctica frecuente y de ahí se desencadenarían otros factores resaltados por los entrevistados, como la falta de cultura del análisis de falla y la falta de conciencia acerca de su utilidad.

¹ Los costos de reparación.

² Los tiempos de parada, la pérdida de producción, las condiciones inseguras de operación, el incumplimiento a clientes, el incumplimiento en indicadores de calidad y el daño a la imagen.

Un buen análisis de costo-beneficio llevaría a una práctica más frecuente del análisis de la falla, lo que conduciría, a su vez, al establecimiento de procedimientos internos para el manejo de las fallas, a la capacitación del personal y a la concientización sobre la importancia de entender la(s) causa(s) raíz de la falla. Esto generaría cultura, medidas correctivas adecuadas y, con el tiempo, menos fallas, menos costos y más control sobre los riesgos.

En este punto, se puede ver la relación del análisis de falla con el riesgo. Si no se realiza una correcta valoración de los hechos ocurridos repercutirá en los datos históricos de la compañía, lo cual impide una correcta valoración de los riesgos y, en muchos casos, las medidas de control podrían ser consideradas inadecuadas.

Surge entonces la pregunta sobre cómo miden las empresas los costos de las pérdidas por las fallas, asunto que definiría un campo interesante para futuras líneas de investigación.

Por otra parte, según la información recopilada, el método es eficiente. Pocas veces no se logra la identificación de la(s) causa(s) más probable(s) de falla. Sin embargo, según lo manifestado por los entrevistados, depende de los recursos y las capacidades disponibles, entre ellas se resaltan: la información adecuada, el tiempo, los recursos financieros, la experiencia, los conocimientos y la intuición del líder del análisis. Dado que en algunos casos no se puede asegurar la correcta identificación de la causa más probable de ocurrencia de la falla, es necesario determinar los errores y factores de desviación que llevan a este resultado.

El error más común mencionado por los profesionales es el análisis en una sola vía, ya que omite variables que deben ser consideradas. La falta de verificación de las conclusiones obtenidas por otros medios lleva a que los resultados logrados sean inadecuados.

En ocasiones, las causas solo incluyen el nivel inmediato de responsabilidad de falla, sin embargo, una causa puede a su vez ser originada por otros factores, y es donde, según lo manifestado por los profesionales, la(s) causa(s) más probable de falla(s) no puede determinarse. La relación entre la causa más probable de falla y el modo de falla es que este último es el punto inicial para determinar las causas de la falla. El análisis de las causas da como resultado la causa raíz. En aquí donde las herramientas, como el análisis de causa raíz y la metodología de ¿Por qué? ¿Por qué? ¿Por qué?, toman relevancia, evaluando no solo las causas físicas sino las humanas y las fundamentales, de tal forma que las causas identificadas no sean falsas, sino que efectivamente se logre llegar a la raíz que permita generar acciones correctivas adecuadas.

Lo anterior revela la existencia de factores de desviación hacia la identificación correcta de la causa más probable de falla y de las posteriores acciones que se realizan, una vez esta es identificada. Dentro de los factores se encuentran:

- Falta de información en los antecedentes, registros de operación y mantenimiento de equipos: la falta de cultura de las empresas lleva a que no se hagan registros de los equipos, lo cual deja a la investigación sin historia de funcionamiento.
- No poder ver la pieza fallada en el lugar donde falló: las empresas, si están aseguradas, tienen como obligación, según lo establecido por el decreto 410 de 1971, Código de Comercio de Colombia, artículo 1074: “evitar su extensión y propagación y proveer el salvamento de las cosas aseguradas”. Lo que significa que las empresas deben emprender acciones para evitar la continuidad de la pérdida, dentro de los límites posibles, una vez se materializan los hechos. Esto lleva a las empresas a actuar de forma inmediata para dar solución a los problemas, más allá que detectar el causante de los mismos.

Por otra parte, en caso de no estar amparadas por algún tipo de póliza las empresas, en su afán de no tener más pérdidas inmediatas, tienden a enfocar sus esfuerzos en darle una solución pronta al problema y desatender la raíz de la falla. Luego, encontrar la causa de un suceso de falla se convierte en algo secundario que, para el común, puede ser analizado en otro momento dejando muchas veces al investigador sin evidencias claras de lo acontecido, lo que dificulta los análisis y, en ocasiones, imposibilita hallar la(s) causa(s) más probable(s) de falla.

Todo esto resulta contradictorio en ambos casos, porque si no se establece el causante se pueden prolongar las pérdidas, hacerlas extensivas o reiterativas. En muchos casos, la pérdida de evidencia se podría considerar un acto de mala fe, que incidiría en los procesos de reclamación. En conjunto, esta información arroja la pregunta: ¿existen protocolos de manejo de reclamaciones y siniestros para las empresas? Este campo resulta interesante como una futura línea de investigación, para profundizar en el área de manejo de siniestros y procesos de reclamación, determinar si existe un vacío en este aspecto sobre el qué hacer, cómo hacer, cuándo hacer, en caso de un evento de falla, y considerar las particularidades que aplican en cada caso, según lo definido en los artículos del Código de Comercio de Colombia.

- Influencia de las partes interesadas: las fallas pueden estar asociadas a procesos de reclamación y en ocasiones determinar el modo de falla; esto es suficiente para identificar el responsable y para que los procesos no se concluyan dejando a un lado la posibilidad de aprendizaje y limitándose a reparar y reforzar. En otro caso prima el interés de las partes en establecer el responsable; por esta razón hay una tendencia a tratar de influenciar el resultado. En este punto la experiencia y la ética del profesional a cargo de la investigación son fundamentales para mantener el ejercicio libre de elementos que lo puedan viciar.
- Falta de recursos económicos para continuar la investigación hasta la causa raíz: muchas veces las investigaciones se pueden complicar más allá de lo esperado, lo que lleva a que las empresas no cuenten con los recursos para continuar con los análisis.

- Falta de tiempo: la premura para la obtención de resultados y los tiempos de espera para pruebas y ensayos hacen que esta sea una variable que incide de manera significativa en los resultados obtenidos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia que existen factores de desviación y errores que pueden llevar a un mal resultado, que no hay leyes, normas, regulaciones, autoridad o entes certificadores que limiten la práctica del análisis de falla a personas idóneas, y tampoco una ley o un ente regulador que dictamine si una investigación de este tipo es fidedigna y obedece a un uso minucioso, ordenado y disciplinado de un método específico. Además, tampoco existen los requisitos que un profesional debe cumplir para poder liderar un análisis de este tipo. Dado este tipo de informalidad, y siendo este un tema tan delicado, que en muchos casos dictamina la responsabilidad sobre una falla, que pueda incluir una demanda o un proceso civil, surgen las preguntas; ¿Debería existir un ente regulador para la práctica del análisis de falla?, ¿una norma que controle su práctica? Ahora bien, considerando que la persona que lidera este ejercicio, en opinión de los profesionales entrevistados, debe ser una persona con ciertos conocimientos, experiencia, aptitudes, actitudes y habilidades, ¿debería este profesional ser calificado por algún ente regulador?

Lo que sí es claro es que el análisis de falla surge en la ciudad como una necesidad que debe ser cubierta. Medellín cuenta con profesionales con los conocimientos, la experiencia, la pericia, la imaginación, la realidad y la integridad para cumplir con esta función. En adición, la ciudad tiene un sinnúmero de laboratorios y universidades (Universidad de Antioquia, Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, entre otras) que, si bien no dan abasto para los análisis requeridos, al menos poseen los instrumentos para ejecutar las pruebas y ensayos necesarios.

Puede ser atrayente para las universidades y los centros de investigación el hecho de que todos los entrevistados manifestaron que algunas pruebas requieren largos periodos de espera, pues los laboratorios están al límite. Esto significa una oportunidad, para otras universidades, de trabajar con este tipo de servicios o para ampliar la capacidad de las existentes y obtener más patrocinio del sector privado.

Otro de los recursos importantes son los profesionales expertos en distintas áreas que pueden ser necesarios al momento de un análisis de falla, cuando la complejidad del mismo lo amerita; según los entrevistados existen este tipo de perfiles en la ciudad.

Todo lo anterior permite demostrar que ya no se trata de atender una necesidad, sino de un servicio permanente, y que se cuenta con los recursos para potencializar el uso del método de análisis de falla en la ciudad.

La forma en que los profesionales entrevistados prestan este servicio es siguiendo la mayoría de los lineamientos dados por los nueve pasos propuestos por la ASM, pero se

evidencia un desconocimiento marcado del origen del método de ASM y su estado del arte, ya que solo dos profesionales manifestaron conocerlo y uno de ellos afirmó que es una guía para aquellos que recién empiezan a hacer análisis.

La práctica de estos profesionales se ha basado en los conocimientos del método científico y en la experiencia, que los ha llevado a trabajar de manera similar a lo establecido en el método de los nueve pasos, lo cual, por otra parte, no descalifica el trabajo realizado por los profesionales durante todos estos años; por el contrario, demuestra una gran capacidad para aplicar el análisis desde los conceptos básicos y para atender las necesidades del medio.

Las diferencias encontradas radican en:

- Ninguno de los entrevistados manifestó el uso de herramientas de análisis, como el análisis de causa raíz o los modos de falla propuestos por la ASM. Estas son herramientas que permiten el registro y trazabilidad del proceso de investigación y que al compartir un lenguaje común y una práctica disciplinada muestran una madurez en la ejecución del análisis de falla, que en el mundo ya ha ido avanzando hasta ser una herramienta de prevención.
- A partir del paso seis, identificar las acciones correctivas posibles, tres de los entrevistados mencionaron hacer ese tipo de acción, sin embargo, no se evidenció que se realizara ningún tipo análisis de selección y evaluación de las acciones correctivas más adecuadas.
- Todos manifestaron la importancia, dentro del análisis de falla, de definir al menos una acción correctiva, pero solo uno de los profesionales describió la necesidad de hacer seguimiento a la acción determinada para evaluar su efectividad.

El uso de herramientas de análisis, reconocidas internacionalmente, permite a las personas hablar el mismo lenguaje técnico, y trabajar bajo ese común denominador proporciona más seguridad y credibilidad en el análisis, ya que son comparables con los análisis realizados a nivel mundial. Por otra parte, el análisis del árbol de acciones correctivas y de una evaluación de las mismas permite identificar las diferentes formas de cómo se puede corregir una falla, atacando la causa raíz o alguno de los niveles de causa de falla identificados y, a su vez, comprobar que la acción seleccionada efectivamente va a eliminar la causa raíz. Lo cual puede contribuir a revisar que todos los parámetros analizados durante la investigación fueron tenidos en cuenta.

Aunque esta investigación se encuentra limitada al análisis de falla realizado en ingeniería, básicamente, desde el enfoque del análisis mecánico y metalúrgico en la ciudad de Medellín el análisis de la información permitió plantear las siguientes inquietudes: ¿cómo se realiza el análisis de falla en campos distintos a los de la ingeniería mecánica, metalúrgica y de materiales? ¿Existirá alguna relación entre los diversos métodos aplicados, si es que existen? ¿Al ser el análisis de falla un procedimiento analítico basado en el método científico podría ser generalizado y aplicado a otros campos de estudio y análisis de la humanidad?

El análisis de falla, como es conocido, se encuentra enfocado hacia los análisis de falla en materiales o de la ingeniería; sin embargo, no se tiene en cuenta que al ser un método tan general de investigación bien podría ser aplicado a cualquier tipo de falla que se presenta en la vida diaria.

Según los profesionales entrevistados la respuesta hacia la reapplicabilidad del método fue positiva, ya que ha demostrado ser una herramienta que puede ser aplicado para estudiar diversos niveles de la falla, con una visión amplia de las causas, hasta tener una visión holística de las circunstancias de los eventos. Eso hace de este método un nicho interesante de estudio para ser generalizado y aplicado en campos distintos a los de la ingeniería y los materiales.

Después de analizar que las áreas de aplicación del método y su frecuencia de uso podrían ser potencializados, que es un método eficaz, que la ciudad cuenta con recursos y capacidades, que más que una necesidad puntual se ha convertido en un servicio continuo, y considerando que la intención de investigaciones como esta es la de promover el uso de dicho método, se demuestra que existe una oportunidad de hacer madurar la práctica del análisis de falla en la ciudad.

Resulta entonces la reflexión de llevar la práctica del análisis de falla un paso más allá, de llevar las investigaciones a comulgar con prácticas realizadas a nivel mundial, de acompañar los resultados con la costumbre de publicar para hacer aportes significativos al medio, para transferir los conocimientos adquiridos a través de la práctica a profesionales más jóvenes y para construir nuevos temas de investigación para las distintas universidades de la ciudad que tienen fortalezas en este campo. Todo lo anterior, con el mayor propósito de mostrar al medio la existencia de los tipos de análisis y sus ventajas y de colaborar en la formación de historia de fallas que pueda ayudar a muchas otras compañías.

Luego, la invitación a los profesionales es de trascender sus conocimientos no solo en las especialidades de ingeniería y materiales en las cuales son expertos, sino también en profundizar en los métodos actuales que se usan en el mundo y en obtener mayores beneficios para toda la ciudad.

6. REFERENCIAS

- [1] D. J. Wulpi, *Understanding How Components Fail*, 3rd ed., Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 2013.
- [2] J. J. Scutti y W. J. McBrine, "Introduction to failure analysis and prevention", en *ASM Handbook*, Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 1986, pp. 3-19.
- [3] V. Ramachandran, *Failure Analysis of Engineering Structures: Methodology and Case*

Histories, Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 2005.

- [4] S. L. T. McGregor y J. A. Murnane, "Paradigm, methodology and method: intellectual integrity in consumer scholarship", *International Journal of Consumer Studies*, vol. 34, n° 4, 2010, pp. 419-427.
- [5] V. Ramachandran, A. C. Raghuram, R.V. Krishnan y S. K. Bhaumik, *Failure Analysis of Engineering Structures: Methodology and Case Histories*, Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 2005.
- [6] W. T. Becker y R. J. Shipley, "Failure analysis and prevention", en *ASM Handbook: Vol 11. Failure Analysis and Prevention*, Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 2002.
- [7] D. Aliya, "The failure analysis process: an overview", en *ASM Handbook: Vol 11. Failure Analysis and Prevention*, Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 2002.
- [8] D. P. Dennies, "Organization of a failure investigation", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 2, n° 3, 2002, pp. 11-16.
- [9] American Society for Metals, "Engineering aspects of failure and failure analysis", en *Failure Analysis and Prevention*, 8th ed., Vol. 10, Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 1975.
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC), "Dependability and quality of service", en *IEC 60050-191 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*, Ginebra, Suiza, Internacional Electrotechnical Commission, 1990.
- [11] M. Rausand y K. Øien, "The basic concepts of failure analysis", *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 53, n° 1, 1996, pp. 73-83.
- [12] British Standards Institution-BSI, "Reliability of systems, equipments and components; Part 5: guide to failure modes, effects and criticality analysis (FMEA and FMECA)", en *British Standard BS 5760*, Londres, Inglaterra, BSI, 1991.
- [13] R. K. Mobley, *Root Cause Failure Analysis*, Boston, Estados Unidos, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [14] A. C. Netherton, "Reliability-Centered maintenance", en *ASM Handbook: Vol 11. Failure Analysis and Prevention*, Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 2002.
- [15] D. A. Ryder, T. J. Davies, I. Brough y F. R. Hutchings, "General practice in failure analysis", en *ASM Metals Handbook: Vol 10. Failure Analysis and Prevention*, Ohio,

Estados Unidos, American Society of Metals, 1975.

- [16] Department of Air Force, "Safety investigations and reports", en *Air Force Instruction-AFI 91-204*, Department of the Air Force, Estados Unidos de Norte America, 2008 [instructivo].
- [17] Department of Energy, "Root cause analysis guidance document", 1992, [en línea]. Recuperado de <https://energy.gov/sites/prod/files/2013/07/f2/nst1004.pdf>
- [18] L. Del Frate, S. D. Zwart y P. A. Kroes, "Root cause as a u-turn", *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, nº 2, 2011, pp. 747-758.
- [19] S.-I. Nishida, *Failure Analysis in Engineering Applications*, Ámsterdam, Países Bajos, Elsevier, 2014.
- [20] D. P. Dennies, *How to Organize and Run a Failure Investigation*, Cleveland, Estados Unidos, ASM International, 2005.
- [21] R. K. Yin, *Case Study Research: Design and Methods*, California, Estados Unidos, SAGE Publications, 2013.
- [22] M. K. Eisenhardt y E. M. Graebner, "Theory building from cases: oportunities and Challenges", *Academy of Management Journal*, vol.50, nº1, 2007, pp. 25-32.
- [23] A. P. Marcos, J. Z. Colón, M. R. Gutiérrez y A. M. P. Santos, *Investigación cualitativa*, Madrid, España, Elsevier, 2014.
- [24] F. L. López-Herrera y H. Salas-Harms, "Investigación cualitativa en administración", *Cinta de Moebio*, nº 35, 2009, pp. 35, 128-145.
- [25] M. E. Galeano, *Diseño de proyectos en la investigación cualitativa*, Medellín, Colombia, Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2004.
- [26] S. R. Hernández, C. C. Fernández y L. P. Baptista, *Metodología de la investigación*, México, México, McGraw Hill, 2010.
- [27] R. E. Sake, *Investigación con estudio de casos*, Madrid, España, Ediciones Morata, S. L., 1999.
- [28] C. Matthews, *A Practical Guide to Engineering Failure Investigation*, Nueva Jersey, Estados Unidos, John Wiley & Sons, 1998.