



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ELEMENTOS DE INVESTIGACIÓN DE FALLAS MECÁNICAS EN ANÁLISIS DE
SINIESTROS**

Juan Carlos Morales Pérez

Asesorado por el Ing. Jorge Iván Cifuentes Castillo

Guatemala, enero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELEMENTOS DE INVESTIGACIÓN DE FALLAS MECÁNICAS EN ANÁLISIS
DE SINIESTROS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUAN CARLOS MORALES PÉREZ

ASESORADO POR EL ING. JORGE IVÁN CIFUENTES CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ENERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (A.I.)
EXAMINADOR	Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Julio César Molina Zaldaña
EXAMINADOR	Ing. Osmar Omar Rodas Mazariegos
SECRETARIO	Ing. José Alberto Boy Piedrasanta (A.I.)

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento de los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ELEMENTOS DE INVESTIGACIÓN DE FALLAS MECÁNICAS EN ANÁLISIS DE SINIESTROS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 6 de mayo de 2019.

Juan Carlos Morales Pérez

Guatemala, 29 de julio de 2019

Ingeniero
Roberto Guzmán Ortiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Guzmán:

Me dirijo a usted para informarle que, de acuerdo con la autorización recibida, he asesorado al estudiante JUAN CARLOS MORALES PÉREZ, carné No. 8111543, en el desarrollo de su trabajo de graduación titulado "ELEMENTOS DE INVESTIGACIÓN DE FALLAS MECÁNICAS EN ANÁLISIS DE SINIESTROS" y, considerando el trabajo satisfactorio en su estructura, contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo remitiéndole a la dirección de escuela para continuar el trámite correspondiente.

Sin otro particular,

Atentamente,



Jorge Iván Cifuentes Castillo
MSc. Ingeniero mecánico
Colegiado No. 3413
ASESOR

Jorge Ivan Cifuentes Castillo
Máster en Ciencias Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 3413



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.260.2019

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ELEMENTOS DE INVESTIGACIÓN DE FALLAS MECÁNICAS EN ANÁLISIS DE SINIESTROS** presentado por el estudiante **Juan Carlos Morales Pérez**, CUI **2454887150101** y Reg. Académico No. **8111543** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, octubre 2019



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.014.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Asesor y del Coordinador del Área Complementaria, al trabajo de graduación titulado: **ELEMENTOS DE INVESTIGACIÓN DE FALLAS MECÁNICAS EN ANÁLISIS DE SINIESTROS** presentado por el estudiante **Juan Carlos Morales Pérez**, CUI **2454887150101** y Reg. Académico No. **8111543** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, enero 2020
/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 009.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ELEMENTOS DE INVESTIGACIÓN DE FALLAS MECÁNICAS EN ANÁLISIS DE SINIESTROS**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Carlos Morales Pérez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, enero de 2020

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mis hijas

Fernanda y Alejandra Morales Lemus.
Porque fueron la luz de todo mi esfuerzo.

Mi esposa

Ana Cecilia Lemus de Morales.
Porque ese esfuerzo fue siempre compartido.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Mi casa de estudios; por acogerme en su seno para mi formación profesional.

Facultad de Ingeniería

Por los conocimientos brindados.

**Ing. Jorge Iván
Cifuentes Castillo**

Por su apoyo y visión en la realización de mi trabajo de graduación.

**Ing. Carlos Humberto
Pérez**

Por su calidad humana y colaboración.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
2. MARCO CONCEPTUAL	3
2.1 Contexto, definiciones y antecedentes.....	3
2.1.1 El concepto de tecnología.....	3
2.1.2 Análisis de fallas mecánicas.....	6
2.1.3 Ingeniería forense.....	9
2.1.4 El concepto de accidente.....	10
2.2 Teorías más importantes.....	11
2.2.1 Causas de accidentes tecnológicos de Petrowsky.....	12
2.2.2 Causas de accidentes tecnológicos de Perrow.....	13
2.2.3 Causas de accidentes tecnológicos de Dörner.....	14
2.2.4 Concepto del autor.....	15
3. SINIESTROS TECNOLÓGICOS	17
3.1 ¿Cómo se ve un siniestro en la realidad?	17

3.2	Esquema conceptual.....	25
3.2.1	Tecnología e ingeniería mecánica: relación crítica.....	26
3.2.2	Categorías de tecnología mecánica.....	29
3.3	¿Qué es un siniestro?.....	31
3.4	¿Cuándo y dónde pueden ocurrir?.....	32
3.5	¿Qué causa los siniestros?.....	33
3.6	¿Por qué analizarlos?.....	35
3.7	Siniestros: un problema a resolver por la ingeniería mecánica....	36
3.8	Características de los siniestros.....	38
4.	FALLAS MECÁNICAS	39
4.1	¿Qué es una falla mecánica?.....	39
4.2	¿Cuándo y dónde pueden ocurrir?.....	40
4.3	¿Cómo surgen las fallas en la tecnología?.....	41
4.4	Fuentes comunes de fallas mecánicas	42
4.4.1	Errores de diseño.....	43
4.4.2	Errores o deficiencias de fabricación.....	43
4.4.3	Deficiencias y errores de montaje.....	44
4.4.4	Fatiga.....	44
4.4.5	Desgaste y deformaciones.....	45
4.4.6	Falta de mantenimiento o mantenimiento deficiente.....	45
4.4.7	Cargas de trabajo sobrepasan especificaciones.....	46
4.4.8	Operación no calificada.....	46
4.4.9	Agentes externos.....	47
4.5	Relación fallas mecánicas y siniestros.....	47
4.6	¿Cómo se puede lidiar con las fallas?.....	48

5.	ANÁLISIS DE SINIESTROS	51
5.1	Un sistema de fallas actuando.....	51
5.2	Geografía de fallas críticas.....	53
5.3	En materia preventiva.....	54
5.4	Contenido de una investigación o análisis de siniestro.....	55
5.4.1	Datos iniciales.....	56
5.4.2	Imagen inicial del siniestro.....	56
5.4.3	Pregunta inicial de ingeniería.....	57
5.4.4	Ingeniería fundamental de la tecnología siniestrada.....	58
5.4.5	Cuadro de hipótesis.....	59
5.4.6	Planificación y presupuesto de la investigación.....	60
5.4.7	Organización del equipo.....	62
5.4.8	La investigación de campo.....	63
5.4.9	El informe de investigación.....	63
5.4.9.1	Generalidades.....	64
5.4.9.2	Estructura de informe sugerida.....	65
6.	CASO ILUSTRATIVO: ACCIDENTE DE UN AVIÓN	67
6.1	Datos iniciales.....	67
6.2	Imagen o visualización inicial.....	67
6.3	Pregunta fundamental de ingeniería.....	69
6.4	Ingeniería y física de la tecnología siniestrada.....	69
6.5	Cuadro de hipótesis (procesos hipótesis).....	73
6.6	Otras consideraciones pertinentes en el caso.....	73
6.7	Esquema de investigación.....	75
6.8	Investigación de campo y confrontación de hipótesis.....	76

CONCLUSIONES..... 79
RECOMENDACIONES..... 81
BIBLIOGRAFÍA..... 83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tren de alta velocidad descarrilado	17
2.	Explosión de una caldera industrial.....	18
3.	Puente colapsado.....	19
4.	Caída de una grúa desde lo alto de una construcción.....	20
5.	Explosión de Chernobyl.....	21
6.	Accidente de avión.....	22
7.	Accidentes de tránsito.....	23
8.	Accidentes en parques de diversiones.....	24
9.	Relación ingeniería mecánica – tecnología mecánica.....	25
10.	Esquema de gestión de fallas mecánicas.....	49
11.	Caso de avión siniestrado.....	67
12.	Fuerzas actuando sobre el ala de un avión.....	71
13.	Timones de un avión.....	72
14.	Proceso de investigación. Caso ilustrativo.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
P_{max}	Carga máxima sobre un cuerpo
C_L	Coeficiente de sustentación
ρ	Densidad del aire
L	Fuerza de sustentación
V²	Velocidad relativa del aire al cuadrado

GLOSARIO

Siniestro	Un accidente grave, que puede implicar lesiones o muerte de personas y daños severos o destrucción de infraestructura.
Tecnología	Equipos, instalaciones y operaciones diseñadas por la ingeniería para las distintas actividades y necesidades de la civilización humana.
Forense	Actividad cuyo fin es encontrar y aportar evidencia científica para aclarar sucesos en litigios legales.
Sistemas	Área y elementos que se enmarcan dentro de un estudio para entender su comportamiento como un todo.
Falla	En un proceso o sistema: una acción, un comportamiento o un evento no previsto que puede producir un proceso no satisfactorio y un resultado indeseable.

RESUMEN

Este trabajo presenta a los accidentes graves, (también llamados siniestros) que ocurren en diversas áreas de la actividad humana, como un escenario caótico y no convencional con que se enfrenta la ingeniería mecánica para indagar y aprender sobre las causas que los producen.

Se propone el concepto de geografía de fallas críticas basada en la física fundamental de la tecnología para la prevención e investigación de accidentes tecnológicos.

Expone los siniestros como un fenómeno intrínseco de los sistemas tecnológicos producto de un sistema de fallas actuantes y ensaya un método para abordar su análisis y determinar las causas de fondo.

Se ilustra su aplicación y se extraen las hipótesis para un accidente de avión y lo confronta con el caso real para mostrar convergencia en los resultados.

OBJETIVOS

General

Plantear recomendaciones, basadas en conocimientos y métodos de ingeniería mecánica, acerca de cómo abordar una investigación, en condiciones de siniestro, para determinar cómo prospera una falla, dónde inicia y bajo qué condiciones, hasta provocar un desastre.

Específicos

1. Exponer las características de un siniestro como un sistema distinto a los tratados con normalidad por la ingeniería.
2. Exponer la ocurrencia de siniestros como un fenómeno sistémico.
3. Exponer el concepto de 'geografía de fallas críticas en una tecnología' y su uso en la prevención e investigación de siniestros.
4. Proponer una guía metodológica para realizar la investigación de siniestros de tipología mecánica.
5. Motivar a los profesionales y estudiantes de ingeniería mecánica a incursionar en el apasionante y retador campo de la investigación forense y a las organizaciones y empresas interesadas en la materia a identificar la aportación idónea de los ingenieros mecánicos en este tipo de proyectos.

INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de una falla mecánica siempre lleva asociado un cuadro de consecuencias. En algunos casos, una falla causará, simplemente, el paro temporal de una máquina mientras se repara o reemplaza la parte afectada y, quizá, en la industria, la pérdida de alguna cantidad de materia prima; mientras, en otros casos, la ocurrencia de la falla puede significar el riesgo de lesiones para personas en sus lugares de trabajo; otro tipo de fallas llegan a desencadenar el colapso abrupto de sistemas con pérdida de vidas humanas, daños al ambiente y altos costos económicos y financieros, pérdida de productividad, de imagen comercial y hasta indeseables demandas jurídicas. Este último tipo constituye el tipo más negativo e indeseable de las fallas, asociadas a los sistemas mecánicos, que se pueden presentar. El escenario físico que desencadenan, en cada caso, es llamado: accidente o siniestro.

Las consecuencias que producen estos sucesos graves hacen absolutamente necesario y justificado investigar cómo y por qué se desarrolla un accidente, con el propósito de aprender de lo ocurrido; descubrir cuáles son las fallas que los inducen; mejorar la tecnología; hacer los sistemas cada vez más seguros; evitar o minimizar su repetitividad; dilucidar en litigios legales, entre dos o más partes, derivados de estos sucesos y para respaldar reclamaciones ante entidades aseguradoras, pero, fundamentalmente: para evitar que se continúe sumando daños y pérdida de vidas humanas.

A medida que ha aumentado la cantidad de sistemas tecnológicos en el tiempo y la intensidad de uso de ellos en todas las actividades, procesos y proyectos de las sociedades humanas; también, se ha incrementado la ocurrencia de fallas que desarrollan accidentes de diversa magnitud y, con

ellas, la demanda de explicaciones que aclaren las circunstancias y los hechos de cómo esos accidentes se han producido. Surge, entonces, el ordenamiento de este tipo de trabajos de investigación especializada bajo el nombre de ingeniería forense cuya finalidad es buscar evidencias, argumentar, con fundamento científico y de ingeniería, una trazabilidad que conduzca a determinar cuál ha sido la causa principal de que un determinado accidente ocurriera.

Desde el punto de vista operativo y de seguridad de personas, un sistema mecánico ideal sería uno que operase sin fallas. Desde luego, no existe tal sistema. Todos los elementos, las máquinas, los equipos, las instalaciones y los sistemas que se diseñan, construyen y operan, en realidad son susceptibles de desarrollar fallas. A la vista: accidentes de tránsito, incendios en bodegas de almacenamientos, descarrilamiento de trenes, accidentes de aviones y helicópteros, explosión de calderas en plantas industriales, hundimiento de barcos que, entre otros muchos, constituyen sucesos típicos, lamentables, que continúan ocurriendo; por lo tanto, se requiere investigar para determinar las causas que dan origen a ellos.

En su rol como creadora de tecnologías, investigar por qué ocurren situaciones de falla catastrófica en máquinas o sistemas mecánicos, es una de las funciones de la ingeniería mecánica.

Este trabajo pretende, específicamente, dirigir el enfoque de elementos y conocimientos propios de la ingeniería mecánica a realizar investigación de fallas, mecánicas y de operación, en condiciones de siniestro e intenta orientar de manera lógica, ordenada y profesional en el esclarecimiento de este tipo de accidentes; se advierte que, el uso de estos conocimientos se ve enfrentado a la dificultad de un proceso distinto del proceso normal de la ingeniería. Es decir, no para crear, probar, instalar o dar mantenimiento a sistemas

mecánicos, como es su natural acción, sino, ahora, para explicar un sistema colapsado, donde el escenario es caótico.

Se plantea un método para definir una ruta de accidentabilidad; se parte de la teoría física, para encontrar diversos puntos o líneas de operación tecnológica que puedan contener las evidencias correctas para determinar dónde surgió y cómo se desarrolló una falla hasta terminar en un accidente.

El contenido es desarrollado en 5 capítulos. El capítulo 1 está dedicado a exponer cuál es el contenido teórico prevaleciente en materia de accidentes tecnológicos; se expone el contexto, las definiciones y los antecedentes del problema. También, se presentan las teorías formales más representativas acerca del estudio de accidentes en sistemas tecnológicos.

En el capítulo 2 se expone cómo es un siniestro y se identifican sus características principales como dato de entrada para un proceso de análisis. El capítulo 3 aborda el tema de fallas mecánicas y expone cómo estas yacen en todos los sistemas tecnológicos. En el capítulo 4, se muestra cómo los mismos conocimientos creadores de la ingeniería mecánica son también útiles para generar hipótesis acertadas, como punto de partida, para encausar una investigación de campo y en el capítulo 5 se conjunta lo planteado aplicándolo a un siniestro real de ocurrencia reciente.

En la exposición de los temas tratados en todo el trabajo prevalece el enfoque sistémico.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las consecuencias que, generalmente, producen los accidentes, son de alto impacto en lesiones y muerte de personas; además de económicas, implicaciones jurídicas, de negocio, sociales, ambientales y daños a infraestructura productiva.

Se necesita enfocar esfuerzos y desarrollar ideas y metodologías, destinadas a reducir la frecuencia y el impacto de los accidentes en las actividades humanas. Es un hecho aceptado que estos eventos son causados por fallas, de diversos tipos y procedencias, no descubiertas o no debidamente consideradas, al interior de los sistemas tecnológicos humanos.

Para llegar a plantear acciones de mejora efectivas en este campo, se necesita estudiar más a fondo el fenómeno de los siniestros o accidentes tecnológicos así como la vía de surgimiento de las fallas que los desarrollan. Las fallas prioritarias a investigar, por el nivel de consecuencias negativas y lamentables que pueden producir, son aquellas que tienen el potencial de desarrollar un siniestro (propósito preventivo) y aquellas que, lamentablemente, alcanzaron a desarrollar uno (propósito de aprendizaje o propósito forense).

Identificar las fallas críticas y cómo se introducen en los sistemas, permitiría comprender y explicar la forma como se desarrollan siniestros en sistemas tecnológicos y plantear propuestas para evitar su repetición en el futuro. Esto constituye trabajo de ingeniería. De ahí, el problema planteado es:

¿Cómo aplicar la ingeniería mecánica para analizar un escenario de siniestro y descubrir el evento inicial de falla que culminó en el accidente?

Bajo esta función, la ingeniería mecánica, con frecuencia, recibe el adjetivo de forense, aunque este término hace referencia a la finalidad de una investigación consistente en el esclarecimiento de un suceso en un litigio de índole jurídico. Para el propósito de este estudio, el término forense significará, además, buscar las evidencias que expliquen un accidente ocurrido.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Contexto, definiciones y antecedentes

Se hace preciso bosquejar cuál es el ambiente actual en el campo de la investigación de siniestros tecnológicos. Qué se dice y cómo ha sido enfocado el problema. En el tema convergen cuatro conceptos, a menudo tratados de forma apenas vinculada: la tecnología mecánica, el análisis de las fallas mecánicas, los accidentes tecnológicos y los procesos de investigación forense.

2.1.1 El concepto de tecnología

La tecnología, en cada época, hace posible lo que se conoce como la civilización humana. En general, por tecnología se entiende toda clase de artefactos, dispositivos, máquinas, instalaciones, uso de materiales, generación y uso de distintos tipos de energía, computadoras, software y todo aquello que se crea y que se usa en la civilización para sostener un nivel de avance, progreso y calidad de vida.

“Tecnología: conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico. Conjunto de los instrumentos y procedimientos industriales de un determinado sector o producto”.¹

1 Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*. <<https://dle.rae.es>>

El campo de acción de la tecnología se fundamenta en los conocimientos y descubrimientos de ciencia y se le considera como un saber sistematizado que abarca el plano práctico y el plano conceptual.

[...] Actualmente, se utiliza la palabra tecnología en campos de actividades muy diversos. Sin plantear la corrección o no de su uso en determinados contextos, en este análisis la vinculamos específicamente a la concepción y elaboración de bienes, procesos o servicios. De esta manera, tomamos la palabra tecnología con un sentido restringido.²

Así es como se conceptualiza, aún en la actualidad, el término tecnología; por excelencia, una obra, un producir de la ingeniería humana en cualquier forma. Mucha de esta tecnología producida abarca el campo de la mecánica, que, por implicación, engloba conocimientos físicos, de la materia, materiales, dinámica del movimiento, cargas, energías, etcétera, que se agrupan como tecnología mecánica.

Las definiciones que se pueden encontrar en muchos materiales publicados navegan, la mayoría, alrededor de esos conceptos, refiriéndose a ella como tecnología factual; aunque pueden encontrarse aquellos que, bajo la lente de lo que se conoce como estudios en el campo de CTS (ciencia, tecnología y sociedad), abogan por incluir el componente social, político y cultural de las tecnologías.

El concepto de tecnología muestra tendencia a evolucionar para adecuarlo a las experiencias y necesidades de la sociedad actual.

2 GAY, Aquiles. *La ciencia, la técnica y la tecnología*. p. 4.

Una forma ingenua de entender la tecnología sería considerarla meramente como cuestión de herramientas (equipos) y aptitudes y conocimientos (programas). Claro que estos componentes son importantes, pero constituyen la superficie de la tecnología, como la punta visible del iceberg. La tecnología también comprende una estructura conexa, e incluso una estructura profunda.³

Estos enfoques ampliados de lo que se entiende por el término tecnología resultan de lo más importante para guiar el presente trabajo porque permiten identificar el medio real donde tienen lugar los eventos que se conocen como accidentes tecnológicos e inducen a plantear cuestionamientos como ¿dónde nacen y prosperan los accidentes: en las máquinas (tecnologías factuales), en las personas, en los procesos, en los sistemas?

Otra corriente conceptual profundiza que “el acervo tecnológico como conjunto de saberes de una sociedad para hacer algo está sustentado en un conjunto de las llamadas tecnologías centrales, que son tecnologías desarrolladas alrededor de un fenómeno específico de tipo físico, químico o biológico”.⁴

Finalmente, se dice del conocimiento tecnológico que:

[...]El conocimiento tecnológico demanda una relación teoría-práctica indisoluble, el acopio permanente de información que permite nuevas formas, nuevas técnicas, nuevos resultados. Es sobre todo interdisciplinar, lo cual le permite redefinir sus dominios e incluso crear otros. Es propio del conocimiento tecnológico transformarse constantemente.⁵

3 GAY, Aquiles. *La ciencia, la técnica y la tecnología*. p. 7.

4 CASALET, Mónica. *Tecnología: concepto, problemas y perspectivas*. p. 8.

5 RODRÍGUEZ ACEVEDO, Germán. *Ciencia, tecnología y sociedad: una mirada desde la educación en tecnología*. Revista Iberoamericana de Educación N° 18. p. 107-143.

Para efectos del tema, basta con estas líneas para establecer, en términos generales, el concepto de tecnología prevaleciente en la actualidad y, además, destacar que a pesar de cierto vínculo o ángulo social que pretenden algunos sectores académicos, los accidentes permanecen sin ser estrechamente vinculados a la operación de las tecnologías como tales, prefiriéndose las afirmaciones que señalan al error humano, y en específico, al de operadores directos, como causante de la mayoría de fatalidades tecnológicas.

2.1.2 Análisis de fallas mecánicas

El término falla es subjetivo, ya que en algunos casos un individuo puede considerar que existe falla de un elemento, mientras que otro puede considerar que no. En la práctica esto depende de qué tanto se está afectando la operación satisfactoria de un equipo debido a la evolución en alguno de sus elementos de algún mecanismo de daño como el desgaste, el agrietamiento o la corrosión.⁶

En efecto, el término falla mecánica puede abarcar un trecho amplio de estados mecánicos irregulares, desde que se percibe la aparición de una anomalía; pasando por estados intermedios, incrementales, hasta un estado de colapso de la pieza o el componente.

Los análisis de fallas se refieren a practicar exámenes, en laboratorios especiales, a elementos fallados hasta el punto de colapso. Con la realización de estos exámenes especializados se busca revelar cuál fue el modo o característica de falla que presenta la pieza o componente mecánico analizado.

6 ESPEJO, Edgar; MARTÍNEZ, Juan Carlos. *Caracterización de modos de falla típicos en cables de transmisión mecánica*. p. 77-83.

El análisis de falla es un examen sistemático de la pieza dañada para determinar la causa raíz de la falla y usar esta información para mejorar la confiabilidad del producto.

El análisis de falla está diseñado para:

- Identificar los modos de falla (la forma de fallar del producto o pieza)
- Identificar el mecanismo de falla (el fenómeno físico involucrado en la falla)
- Determinar la causa raíz (el diseño, defecto, o cargas que llevaron a la falla)
- Recomendar métodos de prevención de la falla.⁷

Según el INTI, se identifican como causas comunes de falla mecánica en estructuras, máquinas y equipos, el mal uso o abuso, errores de montaje, errores de fabricación, mantenimiento inadecuado, errores de diseño, material inadecuado, tratamientos térmicos incorrectos, condiciones no previstas de operación, inadecuado control o protección ambiental, discontinuidades de colada, defectos de soldadura, defectos de forja.

Se puede concluir que bajo la materia AF (análisis de fallas) se analizan elementos fallados. En este punto es prudente preguntarse ¿cuándo se considera a un componente mecánico como “fallado”?

La respuesta a este cuestionamiento en la literatura y la opinión de los expertos parece coincidir en que:

[...]Un sistema o estructura se considera fallado, cuando reúne al menos una de las siguientes condiciones: a. Cuando queda completamente inoperante. b. Cuando queda operante, pero no es capaz de realizar sus funciones en forma satisfactoria. c. Cuando su deterioro es tan serio, que es inapropiado o inseguro para su uso continuo.⁸

7 Instituto Nacional de Tecnología e Investigación. Centro Regional Córdoba. *Análisis de fallas*. <https://studylib.es/doc/5192901/empresas-analisis-de-fallas>.

8 VÉLEZ, Fabio. *Ingeniería forense*. p. 1.

Acercándose, de a poco, al tema central de este trabajo, conviene mencionar que mucho se ha escrito acerca del estudio y la caracterización de fallas mecánicas típicas que, de común, se presentan en las máquinas, los equipos y las instalaciones mecánicas de cualquier clase y aplicación. Así, hay exposiciones sobre análisis de falla de engranes, de ejes de transmisión de potencia, de cojinetes, cadenas, motores, cables, elementos de fijación y un extenso etcétera.

En todos los casos, el objeto de un procedimiento de análisis de falla es un componente específico ya determinado como fallado; escasa es, sin embargo, la vinculación realizada con las condiciones de un desastre tecnológico o un accidente grave. En este contexto, a pesar de su importancia y aplicabilidad, este tipo de análisis resulta ser un componente de una investigación mayor enfocada en un desastre tecnológico, y solo entra en escena una vez que se ha determinado que un elemento concreto está bajo sospecha razonable de falla física.

La existencia de distintos procesos que suelen presentarse como de naturaleza forense para investigación de accidentes tecnológicos propicia una confusión de interpretación. Se debe observar, con sumo cuidado, en cada caso, cuál es el objeto del análisis central en cada proceso propuesto.

2.1.3 Ingeniería forense

Es bien sabido en qué trabaja la ingeniería, pero, ¿qué característica le agrega a la profesión el término forense?, ¿de qué se ocupa la ingeniería forense?, ¿en qué tipo de proyectos se involucra?

La ingeniería forense se define como la aplicación del arte y la ciencia de la Ingeniería en cuestiones que están en, o podrían relacionarse con, el sistema de jurisprudencia, incluidos los sistemas alternativos de resolución de conflictos.⁹

La criminalística o ciencias forenses las definimos como el conjunto de disciplinas donde el objeto común es el de la materialización de la prueba a efectos judiciales mediante una metodología científica. Cualquier ciencia se convierte en forense en el momento que sirve al procedimiento judicial, pero hay que adaptar las técnicas específicas a la finalidad de investigación y judicial de la prueba.¹⁰

[...]aquella actividad de la ingeniería que trata de dar luz, con base técnica, a las discrepancias, divergencias, discordancias, diferencias, desavenencias, disputas o conflictos, en ayuda de la sociedad y del sistema judicial. Siendo así, el ingeniero forense es aquel experto (perito), práctico en materias de su especialidad, con conocimientos y habilidad para desarrollarlas en un foro.¹¹

El adjetivo forense simplemente designa la conexión con, o el uso en, discusiones públicas y debates, o más específicamente los tribunales de justicia.¹² A manera de ejemplo, el análisis de un elemento mecánico para establecer su modo y causa de falla es forense cuando el resultado de las pruebas y el informe que ha de producir es solicitado para ser integrado en la investigación de un hecho o evento que provoca un proceso de esclarecimiento legal.

La ingeniería forense, como vemos, investiga hechos y eventos indeseables de carácter tecnológico, accidentales o delictivos, en cualquier especialidad de tecnología, para esclarecer con fundamento científico y de ingeniería cómo sucedieron estos y cuál o cuáles fueron sus causas.

9 ASTM. *Incidentes que comprometen estructuras*.

https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF13/e5806_spjf13.html.

10 Universitat Autònoma de Barcelona. *Infoanálisis y técnicas avanzadas en ciencias forenses*.

<http://www.policiacientifica.org/UAB-018-Criminalista.pdf>

11 PASCUAL, Luis Francisco. *La ingeniería forense, una actividad de la ingeniería*. p. 84.

12 Colegio de criminalistas de Chile. www.colcrim.cl/el-criminalista/ciencias-forenses/.

La ingeniería forense es aplicable a falla de productos, equipos, componentes, instalaciones, construcciones, dispositivos, herramientas, materiales u operación de una tecnología en su conjunto.

2.1.4 El concepto de accidente

En el concepto de dominio popular, accidente es un evento o suceso obra del infortunio, del destino o de lo divino. En cualquiera de esas aceptaciones, un hecho impredecible, fuera de la voluntad y del control humano.

En el diccionario de la RAE se lee la siguiente definición: suceso eventual que altera el orden regular de las cosas. Suceso eventual o acción de que resulta daño involuntario para las personas o cosas.

Los accidentes, con frecuencia, son una combinación de raros eventos que se suelen asumir como independientes y de difícil coincidencia en el tiempo. Uno de los métodos de protegerse contra ellos es implementando múltiples e independientes capas de protección que hagan más difícil que dichos eventos conlleven a pérdidas de vidas humanas, contaminación ambiental y pérdidas económicas catastróficas.¹³

En el ámbito académico y científico, existe debate e inclinación a evitar el uso del término accidente, para evitar las connotaciones antes citadas; en particular, el carácter aleatorio e imprevisible de tales eventos.

En su acepción corriente, accidente es algo que sucede por casualidad o fortuitamente. El diccionario dice que...

13 CONSUEGRA-GUTIÉRREZ, Jesús. *Guía para la gestión de los riesgos tecnológicos para las empresas adherentes al proceso APELL del D.E.I.P Barranquilla*. <http://helid.digicollection.org/en/d/Jcne03/2.html#Jcne03.2>.

...casualidad y accidente son palabras de sentido negativo que sólo expresan nuestra ignorancia respecto a determinados fenómenos y leyes. Del mismo modo que un ignorante, que desconoce la fuerza expansiva de la pólvora, puede estimar tal cualidad como fortuita o accidental, podemos, al desconocer determinadas cualidades y precedentes de fenómenos, considerar como accidental aquello que no lo es realmente. El accidente y lo accidental existen en la mente, pero no en la realidad.¹⁴

Desde el punto de vista práctico la consecuencia más importante derivada de la atribución de los accidentes al azar es la aceptación resignada de su ocurrencia.¹⁵

2.2 Teorías más importantes

Existen varias teorías, planteadas por profesionales estudiosos de estos sucesos tecnológicos derivados, que tratan de explicar cómo y por qué tienen lugar los accidentes en la operación de los sistemas tecnológicos.

Del análisis de las posiciones planteadas en esas teorías se puede concluir que aún queda mucho camino por andar para dar con una teoría que tome el rol de completamente funcional y certera, que conduzca a una realidad de sistemas más seguros y menos susceptibles de fallas que los que hasta hoy se diseñan y se ponen en operación.

A manera de ubicar el contexto y el momento teórico de este trabajo, se consideran tres de esas teorías, las que parecen ser las de mayor acogida en el ambiente de estudio de los accidentes y las fallas en sistemas de tecnología mecánica, en su más amplio concepto: las de Henry Petrosky, Charles Perrow y Dietrich Dörner.

14 GLIZER, Isaac. *Prevención de accidentes y lesiones: conceptos, métodos y orientaciones para países en desarrollo.* p. 1.

15 *Ibíd.*

Las teorías consideradas aquí, lo son por el hecho de mostrar los tres principales y más comúnmente identificados factores causantes de accidentes, a saber: el error humano, el diseño y la complejidad de los sistemas.

2.2.1 Causas de accidentes en sistemas tecnológicos de Petrosky

Principalmente, las causas de fallas se deben a errores de diseño que se cometen de manera recurrente y pueden observarse patrones en esos errores que se dan en la historia de la ingeniería.

Esos patrones de errores pueden ser determinados al estudiar casos de accidentes paradigmáticos. Según esta teoría, el error de mayor impacto en la ocurrencia de accidentes se identifica en el proceso de diseño de los sistemas mecánicos.

Destacan los siguientes enunciados referidos al diseño ingenieril de nuestros sistemas tecnológicos:

- Sin importar cuántos diseños exitosos puedan haberse derivado de ella, ninguna hipótesis puede ser probada de manera incontrovertible, ya que con solo una falla es suficiente para proveer un contraejemplo a dicha hipótesis.
- Todos los diseños se realizan en un estado de relativa ignorancia del comportamiento completo del sistema diseñado.
- La visión estrecha (o enfoque encasillado) impide a los diseñadores considerar las fallas tan cuidadosamente en los límites del diseño principal como dentro del mismo.

En relación a la postura de Petrosky, en este trabajo se considera que el diseño es una actividad originadora de tecnología pero debe ser más anticipadora y ambiciosa, no enmarcándose solo en la construcción de un producto mecánico que sea recibido con beneplácito absoluto por la sociedad usuaria sino incluyendo, de manera realista (incluso hasta fatalista), un horizonte de previsiones negativas relacionadas con posibles fallos que el sistema pueda presentar en un momento dado de su vida operativa. Es decir, debe ampliarse a un diseño considerativo, al menos, de fallos dramáticos ya que de otros de menor impacto se encargaría el mantenimiento en operación.

2.2.2 Causa de accidentes en sistemas tecnológicos de Perrow

Se basa, principalmente, en el análisis de accidentes de alto impacto. Afirma que la verdadera, y de fondo, causa de la ocurrencia de estos, radica en el grado de complejidad de cada sistema.

Muchos componentes combinados con diversos modos de falla elevan el potencial de accidentes en los sistemas más complejos y en aquellos que muestran mayor acoplamiento. Por acoplamiento se refiere a la dependencia de unos componentes o procesos, con otros. Bajo estas condiciones de alta complejidad y fuerte acoplamiento, es inevitable que ocurran accidentes.

Las fallas interaccionan en un sistema de esta clase hasta que, en ciertas condiciones, se produce un accidente. Debido a la consideración de que en la complejidad de los sistemas construidos subyacen las fallas interactuando y que tarde o temprano se producirá un accidente, estos accidentes son llamados accidentes normales, es decir, que son inherentes a los sistemas.

En resumen, la ocurrencia de accidentes de alto impacto es algo intrínseco e inevitable en los sistemas complejos y de acoplamiento fuerte, por

la interacción de múltiples fallas que se dan en estos en determinado momento, como sería en una planta nuclear (Chernobyl, por ejemplo) o plantas petroquímicas, entre otras.

2.2.3 Causa de accidentes en sistemas tecnológicos de Dörner

También para esta teoría, los accidentes son más significativos en sistemas complejos; donde, complejos, se refiere a sistemas de muchas variables interrelacionadas, sistemas que funcionan por sí mismos (dinámica interna del sistema) y se destaca la característica de intransparencia, que se refiere a que las características completas del sistema no pueden ser visualizadas.

Sin embargo, difiere de la anterior en que las causas fundamentales de los accidentes radican en la toma de decisiones por parte de quienes operan y controlan el sistema.

Al respecto de este enunciado, se afirma que las decisiones tomadas en casos de accidentes muestran ciertas características, entre ellas:

- Actúan sin previo análisis de la situación.
- Fallan en anticipar efectos secundarios.
- Asumen como correctas sus decisiones basándose en la ausencia de efectos negativos inmediatos.
- Se trata con la situación y no con el proceso.
- Falta de consideración de efectos secundarios.
- Tendencia a pensar en términos de relaciones causa-efecto aisladas.
- Violación de normas de seguridad por excesiva autoconfianza.

2.2.4 Concepto del autor

La posición de esta tesis es que, tanto en los sistemas naturales como en los sistemas artificiales o tecnológicos, existe una línea de realidades entre dos puntos extremos: por un lado, un mundo caótico en el que las posibilidades de falla son innumerables y, en el otro extremo, una realidad pasiva, cuasi inerte, en el que la posibilidad de falla sería cero. Ambos, desde luego, son casos idealizados, es decir, que no ocurren en la vida real.

En el medio, en el trayecto de un punto extremo al otro, existe una geografía de fallas críticas, y, dentro de ella, aún, una línea de falla crítica y potencial que indicaría la peor condición, en el caso de que se activara, que un sistema puede afrontar. Tal cual, las fallas en la corteza terrestre, la cadena volcánica del planeta o los virus como potenciales causantes de fallas en la salud humana, son innumerables, sin embargo, no significa que enfermemos todos los días de todas las cosas posibles. Existe en todos estos temas, una geografía crítica.

En términos de prevención, previsión y anticipación, las fallas en sistemas mecánicos, en mi opinión, deben ser atendidas de esa forma. Ubicar y estudiar una potencial línea de falla crítica y atacar sobre ella con sistemas de prevención de alto nivel, desde el diseño de los sistemas, antes de entrar en plena operación, así como los procesos de operadores directos e indirectos del sistema.

En este trabajo de tesis de grado, el alcance y propósito se limitará a tratar de obtener los elementos cruciales, basados en la física y la ciencia mecánica, que deben considerarse en la investigación de siniestros ocurridos o en prevención de su ocurrencia.

3. SINIESTROS TECNOLÓGICOS

3.1 ¿Cómo se ve en la realidad un siniestro?

Para centrar la idea del tipo de accidentes al que se refiere en este trabajo, bastará con observar las siguientes imágenes de siniestros ocurridos en diversas áreas de operación de las tecnologías actuales.

Figura 1. **Tren de alta velocidad descarrilado**



Fuente: SERRANO, Anabel; GARCÍA, Gema. *Quinto aniversario del accidente del tren Alvia de Santiago*. https://elpais.com/elpais/2018/07/19/album/1531994457_358980.html#foto_gal_1. Consulta: 11 de junio de 2019.

El 24 de julio de 2013, un tren de alta velocidad que viajaba de Madrid a Ferrol, se descarriló en un tramo curvo de la vía; 80 muertos y 140 heridos. El tren se desplazaba a 179 kilómetros por hora en un tramo de la vía para el que la velocidad máxima era de 80.

Figura 2. **Explosión de una caldera industrial**



Fuente: AFP. OK DIARIO. <https://okdiario.com/internacional/ocho-muertos-explosion-fabrica-textil-banglades-1129214>. Consulta: 11 de junio de 2019.

Las calderas son equipos mecánicos que trabajan con vapor de agua a presiones elevadas. El daño que pueden causar, en caso de producirse una explosión, es muy grande, como se puede ver en la ilustración.

La presión de vapor y la capacidad del recipiente y los conductos para soportarla en forma segura, de nuevo enfoca en el campo de la física para lograr establecer una geografía de fallas críticas en la tecnología de calderas.

La ilustración corresponde a una explosión ocurrida en una planta textil en Bangladesh en julio de 2017. El saldo inicial reportado fue de 8 muertos y más de 50 heridos, además de la destrucción del inmueble, como se puede apreciar.

Figura 3. **Puente colapsado**



Fuente: Reuters. QUIÉN. <https://www.quien.com/espectaculos/2014/07/03/puente-construido-por-el-mundial-colapsa-y-deja-dos-muertos-y-varios-heridos>. Consulta: 11 de junio de 2019.

Las obras en construcción, como puentes y edificios, constituyen también sitios con potencial de siniestros. El puente desplomado, ilustrado en la figura de arriba, sucedió en Belo Horizonte, Brasil. Estaba siendo construido como parte de las obras de infraestructura para el Mundial de fútbol 2014.

2 muertos y 19 heridos, así como vehículos destruidos y el costo del puente.

Otro ejemplo representativo de accidentes en obras en construcción ocurrió en Seattle en abril de 2019. Una grúa, que era parte del equipo de la

obra, cayó sobre la calle desde lo alto de un edificio en construcción en el nuevo campus de *Google*; 4 personas murieron y varias más salieron heridas.

Figura 4. **Caída de una grúa desde lo alto de una construcción**



Fuente: Cuba Noticias. <https://www.miradacubana.com/mundo-noticias/cuatro-personas-fallecen-tras-caida-de-una-grua-en-estados-unidos>. Consulta: 11 de junio de 2019.

Figura 5. **Explosión de Chernobyl**



Fuente: FUENTES, Jorge. *Guioteca*. <https://www.guioteca.com/los-80/el-desastre-de-chernobyl-asi-fue-el-peor-accidente-nuclear-de-la-historia/>. Consulta: 11 de junio de 2019.

La fotografía corresponde al accidente en la central nuclear de Chernobyl, en abril de 1986. La cantidad de dióxido de uranio, carburo de boro, óxido de europio, erbio, aleaciones de circonio y grafito expulsados, entre otros materiales radiactivos y tóxicos, se estimó como de unas 500 veces mayor que el liberado por la bomba atómica arrojada en Hiroshima en 1945.

Este accidente nuclear, sería llamado por las Naciones Unidas como la mayor catástrofe ambiental en la historia de la humanidad.

Las consecuencias continúan hasta la fecha actual y permanecerán por cientos de años.

Figura 6. **Accidente de avión**



Fuente: ROQUE, Adalberto. *El País*.

https://elpais.com/elpais/2018/05/18/album/1526666968_136908.html?r. Consulta: 12 de junio de 2019.

Mayo 2018: un avión Boeing 737 de la compañía mexicana Global Air, operado por Cubana de Aviación, se estrella en La Habana a pocos minutos de haber despegado del aeropuerto José Martí, en un vuelo interno, rumbo a la ciudad de Holguín, al este de la isla; 110 personas fallecidas.

Cabe mencionar, sin embargo, que la tecnología de aviones tiene un muy bajo índice de accidentes a nivel mundial. El promedio de muertes en accidentes de avión durante los últimos 5 años es de 480 fatalidades por año; lo que convierte al avión en el medio más seguro de transporte.

Figura 7. Accidentes de tránsito



Fuente: JUAREZ, Tulio. *El periódico*.
<https://elperiodico.com.gt/nacion/2018/02/21/desastre-vial-en-la-villalobos-accidente-de-tres-vehiculos-del-transporte-pesado/>. Consulta: 12 de junio de 2019.

Cada año mueren en el mundo alrededor de 1,2 millones de personas como consecuencia de siniestros viales y se estima que otros 50 millones sufren lesiones graves que los incapacitan de forma parcial o total.¹⁶

16 SORIA, Dalve; et al. BID. *Estrategia de seguridad vial. Contribuyendo a disminuir la brecha de siniestralidad en América Latina y el Caribe: resultados del primer quinquenio y plan de acción 2016-2020*. p. 9.

Figura 8. Accidentes en parques de diversiones



Fuente: Soy 502/Guatemala PhotoStock.

https://www.soy502.com/sites/default/files/styles/full_node/public/2019/Jun/30/31447057501_cc637c91e7_b.jpg. Consulta: 12 de junio de 2019.

Parque ecológico Pino Dulce, Jalapa, Guatemala; 30 de junio 2019; una joven sufrió múltiples fracturas al caer, desde gran altura, cuando el cable en el que hacía *canopy* se rompió. Un accidente similar en *Canopy*, se registró en Perú, en abril de 2018: una turista y su guía murieron cuando el cable que los sostenía se rompió mientras ellos se deslizaban.

Los parques de diversiones contienen, en esencia, juegos mecánicos que estarán sometidos a un intensivo uso por parte de las personas que los visitan. El potencial de accidentes es real y los sucesos deben ser analizados para mejorar las tecnologías, integralmente entendidas.

cómo se están produciendo las fallas al interior de los sistemas con una visión más amplia (enfoque sistémico).

3.2.1 Tecnología e ingeniería mecánica: relación crítica

Hay mucho debate en el ambiente académico, desde diferentes ángulos, acerca de la gestión de la tecnología, aún acerca de la definición de tecnología. Con el propósito de mantener este como un trabajo más aplicativo en la práctica, no se hará mención de las muchas posturas alrededor del tema. Se limitará a decir, para nuestros propósitos prácticos, que el término tecnología se refiere a los avances y mejoras en la forma de hacer las cosas en nuestra civilización. La tecnología es el producto de la ingeniería. Dicho de otro modo, la tecnología es la expresión de la ingeniería (aunque, ciertamente, hay una tecnología empírica que sería solo técnica).

Por extensión, tecnología mecánica es la forma en que se resuelve la necesidad de realizar trabajos y funciones mediante el uso de energía y la fabricación de herramientas, máquinas, equipos, instalaciones y estructuras a partir de conocimientos físicos y de materiales en general. Pero ha de agregarse: con procesos y procedimientos adecuados para hacer cada sistema: eficaz, eficiente, seguro, económico, sostenible y no destructivo. Este hacer integral es la ingeniería mecánica.

“Se define la ingeniería mecánica como la actividad humana encaminada a transformar la naturaleza al servicio de las necesidades del hombre, en los campos de la investigación, desarrollo, diseño, construcción, operación, mantenimiento y comercialización de sistemas y equipos mecánicos”.¹⁷

¹⁷ Escuela de Ingeniería Mecánica. USAC.
http://emecanica.ingenieria.usac.edu.gt/sitio/?page_id=10.

La clasificación internacional de ocupaciones, emitida por la Organización Internacional del Trabajo dice de la ingeniería mecánica:

“Los ingenieros mecánicos proyectan y dirigen la producción, el funcionamiento, la conservación y la reparación de máquinas y maquinaria e instalaciones, equipos y sistemas de producción industrial e investigan y asesoran al respecto, o estudian aspectos tecnológicos de determinados materiales, productos o procesos y dan asesoramiento pertinente.

Sus tareas incluyen las siguientes:

- Proyectar máquinas y máquinas herramientas para las industrias manufacturera, minera y de la construcción y otros fines industriales, así como para la agricultura, y asesorar al respecto.
- Proyectar máquinas de vapor, motores de combustión interna y otras máquinas y motores no eléctricos, utilizados para propulsar locomotoras de ferrocarriles, vehículos de transporte por carretera y aeronaves o para hacer funcionar instalaciones industriales o de otro género, y dar asesoramiento pertinente.
- Proyectar sistemas de propulsión para buques, centrales generadoras de energía, sistemas de calefacción y ventilación, mecanismos de gobierno y dirección, bombas y otros equipos mecánicos, y asesorar al respecto.
- Proyectar cascos y superestructuras de buques y otras naves, y asesorar al respecto.
- Proyectar fuselajes, trenes de aterrizaje y otros equipos para aeronaves, y asesorar al respecto.
- Proyectar carrocerías, sistemas de suspensión, frenos y otros elementos de vehículos automóviles, y asesorar al respecto.
- Proyectar sistemas y equipos de calefacción, ventilación y refrigeración, y asesorar al respecto.
- Proyectar instalaciones y equipos mecánicos para la producción, control y utilización de energía nuclear, y asesorar al respecto;

- Proyectar partes o elementos (salvo los eléctricos o electrónicos) de aparatos o productos como procesadores de textos, ordenadores, instrumentos de precisión, cámaras y proyectores, entre otros, y asesorar al respecto.
- Especificar y verificar métodos de producción o instalación y el funcionamiento de maquinaria agrícola y de otras máquinas, mecanismos, herramientas, motores, instalaciones o equipos industriales.
- Establecer normas y procedimientos de control para garantizar el eficaz funcionamiento y la seguridad de máquinas, mecanismos, herramientas, motores, dispositivos, instalaciones y equipos industriales.
- Localizar y corregir deficiencias.
- Organizar y dirigir el mantenimiento y reparación de máquinas, mecanismos, herramientas, motores, dispositivos, instalaciones y equipos industriales.
- Estudiar aspectos tecnológicos de determinados materiales, productos o procesos, y asesorar al respecto.
- Mantener contactos técnicos y celebrar consultas con otros especialistas pertinentes;
- Preparar ponencias e informes de carácter académico o científico;
- Desempeñar tareas afines;
- Supervisar a otros trabajadores¹⁸.

Los enunciados anteriores, expresan actividades como la de la investigación, la de asesoría y la de cuidado por la correcta operación de los sistemas. Esto es crucial en la comprensión y análisis de las tecnologías y de sus problemas asociados que aquí se tratan: que en operación, las tecnologías, entendidas como sistemas, desarrollan deficiencias que están ocasionando accidentes críticos. Se está asimilando que una tecnología mecánica no se circunscribe únicamente a su parte sólida, sino, abarca también a la de sus procesos de operación. La ingeniería mecánica debe ampliar su nivel visual, y atender, revisar y resolver, hasta lograr operaciones más limpias de accidentes.

18 OIT. *Clasificación internacional uniforme de ocupaciones*.
<https://www.ilo.org/public/spanish/bureau/stat/isco/isco88/2145.htm>

Producción y operación de una determinada tecnología mecánica no son dos eventos tecnológicos independientes. La falla de uno induce a la falla en el otro. Los reportes y estadísticas de accidentes de distintas organizaciones y autoridades alrededor del mundo, están mostrando que, un porcentaje mayoritario de accidentes desastrosos están teniendo lugar por fallas en procesos operativos (directos e indirectos), lo que evidencia y respalda la afirmación anterior. La diferencia está en que a esta forma de surgimiento de fallas se le está llamando, genéricamente, error humano. Según el criterio defendido en este trabajo, lo que sucede es más bien una deficiencia tecnológica que permite el accionar, no controlado, de personas sobre aspectos puntuales críticos de los sistemas que operan.

En el diseño tecnológico de sistemas con potencial de accidentes, los procedimientos de seguridad deben alcanzar los procesos operativos (operadores directos, administradores, contratación de personal y tomadores de decisiones), hasta entonces, una tecnología será más completa.

3.2.2 Categorías de tecnología mecánica

Para efectos de estudio y especialización, se agrupa la tecnología alrededor de algunos criterios. Se encuentran así, categorías de tecnología mecánica, por ejemplo, según el medio o forma de energía que se utiliza para una máquina o sistema y también se tiene otra categorización según el proceso o industria a la que son destinadas las máquinas, artefactos o instalaciones que se construyen y operan.

Tecnología del vapor, tecnología del aire comprimido, tecnología de energía solar, tecnología hidráulica. Si se categoriza por materiales: tecnología de metales, de plásticos, de fibra de carbono, entre otros. Pero también se habla de tecnología vehicular, tecnología de aviones, tecnología espacial,

tecnología automotriz, tecnología de ferrocarriles, tecnología de maquinaria agrícola, tecnología de explotación petrolífera, tecnología de minas, etc.

Cada uno de estos productos de la ingeniería mecánica, es decir, cada una de estas tecnologías, son creadas utilizando un amplio menú de conocimientos: fuentes y transformación de energía, comportamiento de materiales, leyes físicas diversas, dinámica del movimiento, termodinámica, calor, presiones, geometría, matemática, cuerpos y partículas, entre otros.

Pero también, para completar la funcionalidad de estas tecnologías, se deben tener diversos mecanismos de usabilidad: modos de operación directa, acciones de mantenimiento apropiadas, controles pertinentes, análisis y decisiones asociadas, entrenamientos necesarios, normativas prudentes, entre otros. La tecnología mecánica es, así, un producto más grande que solo la parte sólida visible. Es la aplicación de la física y un paquete de procesos operativos asociados a su uso. La tecnología es, en un concepto ampliado: funcionalidad mecánica.

Con esto en mente, ahora podemos avanzar a explorar, el centro de nuestro esquema de la figura 9, el espacio de las fallas mecánicas y de los accidentes y siniestros que tienen lugar en la tecnología. En concreto, fallas mecánicas y siniestros, como apunta el título de este trabajo. Se hará analizando por separado cada uno de estos fenómenos, para luego amalgamarlos en el análisis de la ocurrencia de sucesos desastrosos que, por alguna causa, suceden y se sufren, como eventos indeseables, en el uso de las tecnologías mecánicas, es decir, de las funcionalidades de naturaleza mecánica.

3.3 ¿Qué es un siniestro?

Con el término siniestro se describe a un suceso que ha terminado en daño o destrucción de infraestructura, maquinaria, equipos e instalaciones, edificios y que, generalmente, habrá producido lesiones a personas o muertes y también a aquellos sucesos que causan daños ambientales.

El término siniestro es sinónimo de accidente. “[...] se puede definir también como la avería, destrucción fortuita o pérdida importante que sufren las personas o la propiedad, y cuya materialización se traduce en indemnización”.¹⁹

No todo accidente es un siniestro. Depende de la magnitud de los daños y las consecuencias; y no todo siniestro es un accidente, ya que también puede darse el caso de tratarse de un suceso provocado intencionalmente, en cuyo caso se trataría de una acción criminal.

Para este estudio, siniestro es un accidente grave. Un suceso físico, tecnológico, de consecuencias negativas y evidentes para las personas, la infraestructura o el ambiente.

Es necesario anotar, también, que el término siniestro es utilizado en la terminología de seguros. Para las compañías aseguradoras, significa todo aquel evento de daño que está incluido o descrito en una póliza de seguro que adquiere una persona, individual o jurídica. Es siempre tratado como sinónimo de accidente.

19 Sensagent-diccionario. Diccionario.sensagent.com/siniestro/es-es/

3.4 Cuándo y dónde pueden ocurrir

Un accidente grave puede suceder en cualquier lugar y actividad donde se opere o intervenga algún tipo de tecnología físico-mecánica.

Durante toda la historia de la civilización se tiene noticias de eventos lamentables, daños o destrucción de infraestructura, lesiones y muerte de personas, principalmente. En la actualidad, estos eventos ocurren en cualquier lugar de trabajo, aún con tecnologías livianas; sin embargo, este trabajo trata sobre aquellos accidentes que representan daños mayores, como ya se ha dicho.

De acuerdo a noticias y registros alrededor del mundo, esto sucede en plantas industriales, en bodegas de almacenamiento, en el tránsito de ciudades y carreteras, en transporte marítimo, en aviación, en plataformas petrolíferas, plantas químicas, instalaciones portuarias, en puentes, edificios, parques de diversiones mecánicas, la industria espacial, en transporte de químicos y combustibles, en obras de construcción, plantas de generación de energía, entre otras.

¿Cuándo pueden ocurrir? En cualquier momento. Una de las características principales de los siniestros es que son imprevistos.

Se tiene tan poco control sobre ellos que no se puede anticipar cuándo ocurrirá uno, ni dónde. Solo se sabe que ocurrirán, porque las tecnologías, a pesar de los esfuerzos en el aspecto de seguridad, continúan siendo tecnologías falibles; vulnerables al desarrollo de estos fenómenos. Es preocupante, solo pensar en una posibilidad desastrosa siempre vigente, pero, a nivel macro y a nivel estadístico, no debe sonar tan alarmista, en realidad las tecnologías actuales se muestran, en el tiempo, bastante seguras, sin que eso

signifique garantía de que no se sufrirá una experiencia negativa. Y es preciso enfatizar que: bastante seguras, no es ni cercano a aceptablemente seguras.

3.5 ¿Qué causa los siniestros?

O también: ¿por qué ocurren siniestros? Esta es una pregunta vital a la que, fuera del ámbito ingenieril y de seguridad, raras veces se le encuentra una respuesta. Aún en el ámbito de organizaciones, prensa, publicaciones, y los comentarios y opiniones del ciudadano común, se dice que al menos el 80 % de ellos son directamente atribuidos a errores humanos: negligencia, descuidos, irresponsabilidad, falta de capacitación.

Parece ser, que tal tipo de respuestas, aunque buena parte de verdad guardan, solo se sigue reproduciendo, como un eco, la misma voz escuchada. Una velada interpretación parética.

En realidad, el asunto es mucho más complejo. Siguiendo a estudios formales, como las teorías de Perrow, Petrosky y Dörner, estos accidentes obedecen a condiciones de sistemas lo que, naturalmente, involucra el error humano, pero no solo en la parte final de un suceso en cuestión, como se suele pensar, sino en otras etapas como el diseño, la fabricación, el montaje, entre otras, y aún en etapas de decisiones de administración y control de estos sistemas.

Toda tecnología para funcionar en todo lo que se hace, forma parte de sistemas; no puede pensarse en un mecanismo, máquina o estructura aislada de la que sea fácil concluir, que los errores y descuidos de operadores son la causa central de grandes accidentes. Todo lo que está presente e interviene en la operación de una tecnología es susceptible de falla.

Los siniestros se producen porque existen fallas en los sistemas. Muchas fallas. De materiales, de pericia humana, mecánicas, de sistema y hasta de ética y moral. Aún en aquellos sitios donde no se están produciendo eventos desafortunados, existen las fallas. Sin embargo, para que el accidente se desarrolle se necesita un último eslabón que se rompa, un desencadenador. La mecánica es la misma aún en el interior de los hogares, solo que aquí, los accidentes suelen no ser tan impactantes o suelen ser vistos solo como pequeños sucesos casuales e inoportunos; son pequeños eventos que pasan casi inadvertidos. Desde luego, no se está tratando de comparar un avión o un tren de alta velocidad con la apacible quietud del jardín de una casa.

Los accidentes y su magnitud son más propicios, casi inevitables, en sistemas complejos y fuertemente acoplados. Bajo el enfoque del presente trabajo, tal complejidad deviene de una serie de actores, fases y momentos que no acostumbramos considerar ni atender como es debido. Por ejemplo, cuando en la literatura sobre accidentalidad se afirma que alrededor del 80 % de los accidentes son causados por errores humanos, eso podría interpretarse como que las personas son incapaces de realizar tareas cuidadosas con un buen acopio de confiabilidad y que todo uso o contacto con sistemas y máquinas donde humanos estén operando significaría correr un alto riesgo.

Bajo ese, simplista, punto de vista, para todas las fallas que ocurren se podría ubicar su origen en errores humanos ya que son las personas quienes tienen ambiciones, ideas, calculan, seleccionan materiales, fabrican, construyen, compran, establecen procesos o dejan de establecer otros, etc. Toda falla o debilidad es, de un modo generalista, introducida por nosotros en algo que se dispone hacer o no hacer. Lo que se observa en la línea final de las operaciones es solo eso, la última parte, lo superficial.

Las fallas de la tecnología son semejantes a los intersticios atómicos que existen al interior de los materiales. Las fallas son debilidades y falencias en los procesos y los accidentes son procesos en los que las fallas se deslizan por esos intersticios.

Los seres humanos estamos, y continuaremos estando, ligados a los procesos que se crean, porque se es parte de ellos, a veces de formas directas y otras de formas indirectas. Nada actúa solo, aunque en alguna nueva tecnología así lo parezca, con el uso de la más reciente novedad: la inteligencia artificial. Cualquier error o falla que surja a partir de artefactos así diseñados, habrá, igual, sido diseñado y programado por humanos, por tanto, es de esperarse que: nuevas fallas vendrán.

3.6 ¿Por qué analizar siniestros?

Los accidentes derivados del uso de tecnologías y operación de artefactos y sistemas han sucedido desde siempre, en diferentes etapas de la civilización. A lo largo del tiempo y del estudio posterior de tales sucesos, se ha aprendido mucho acerca de cómo evitar nuevos casos de los mismos (por supuesto, el costo, en las diferentes épocas y circunstancias, ha sido también muy grande). Pero todo esto todavía no es suficiente. A medida que el mundo se tecnifica y se incrementa la cantidad e intensidad de uso de sistemas en la rutina diaria de las sociedades, en los diferentes campos de actividad humana, los accidentes lamentables, con sus efectos y consecuencias, continúan, no solo sucediendo, sino, en no pocas áreas, aumentando.

Sin importar el tipo de ambiente o de actividad, o el lugar del mundo donde sucedan, o el tipo de equipo involucrado, la cantidad total de accidentes de impacto lamentable, es un conjunto numeroso. Esto obliga a la sociedad, en general, a las compañías y organizaciones y a la ingeniería, en particular, a

revisar cómo se diseñan, cómo se construyen y cómo se operan los sistemas para encontrar nuevas ideas y metodologías para hacerlos más seguros. Es un objetivo de civilización. Podría decirse que, entre otros factores como la eficiencia y la productividad, la ocurrencia de accidentes es una medición de la calidad de la ingeniería humana.

Se quiere y se disfruta de los avances, pero se quiere, se necesita y se aspira a minimizar o, de ser posible, eliminar los daños que se sufren en el camino, en la vida cotidiana como civilización. Para conseguir eso, es necesario estudiar los accidentes en los sistemas como un problema tecnológico.

3.7 Siniestros: un problema tecnológico a resolver por la ingeniería mecánica

Del diagrama de relación tecnológica (figura 9) se deriva la relación directa de la creación y operación de tecnologías con unos efectos o subproductos, indeseables, pero reales, que se denominan accidentes y otros más graves, siniestros. En este punto, es necesario visualizar y comprender con claridad que el concepto de tecnología abarca un campo más amplio que solo la parte sólida de los aparatos, mecanismos o instalaciones, y también más que la canalización y aprovechamiento de la energía misma que circula por ellos.

Una tecnología solo adquiere sentido real y completo cuando está en pleno funcionamiento. Y la realidad es que, a pesar de cierto nivel de automatismo que pueda haber en los aparatos y sistemas, hay muchos más elementos actuando en ese funcionamiento que no son visibles, y que, sin ellos, tal tecnología no funcionaría. Por tanto, al ser estos elementos propios y necesarios para el funcionamiento, deben ser considerados también parte de la tecnología.

Por tales elementos no visibles se refiere a cosas como los procedimientos establecidos que se ejecutan por el personal operador; decisiones que toman los administradores de un sistema que intervienen o tratan, directamente, con el funcionamiento de la maquinaria, instalaciones o sistemas, decisiones de compra de partes como repuestos, decisiones de tiempos y márgenes de operación, el entrenamiento o no entrenamiento de los operadores directos, operadores indirectos, sincronización de eventos, decidir sobre la longevidad razonable de las máquinas e instalaciones , y otros más.

Esto conduce a pensar en una tecnología para una actividad específica como una máquina ampliada.

Tecnología puede entenderse como un conjunto operativo mayor que solo la maquinaria física y sus instalaciones asociadas. Contiene a los conocimientos específicos empleados, a las máquinas, a las instalaciones, a los procedimientos diversos relacionados con la operación satisfactoria, a los controles, a los operadores (directos e indirectos), a las decisiones, rutinas, documentación, mantenimiento y otras actividades. En general, todo aquello que rodea, participa y determina una operación central.

En el capítulo destinado a las fallas mecánicas, se muestra cómo esto tiene implicaciones concluyentes. Por el momento, solo se adelanta que los siniestros son, en esencia, desenlaces físicos, por lo que es ahí donde se encuentra con ellos, en la parte física de la tecnología: en las máquinas, las instalaciones, las edificaciones y los demás sistemas dinámicos. Por tanto, constituyen un problema a resolver por la ingeniería.

3.8 Características de los siniestros

Está claro que en los sistemas tecnológicos se están produciendo eventos que no se quiere que se produzcan. Se tiene que corregir, pero en este trabajo de ingeniería, no hay planos ni cálculos realizados. Apenas comienza la tarea de observación y reconocimiento del fenómeno bajo estudio.

Se plantean las siguientes características.

- Todo siniestro es un evento físico indeseable.
- Son provocados por fallas.
- No se pueden predecir (hasta el momento).
- Son sucesos fuera de control.
- Quedan representados, físicamente, por el colapso o falla grave de un sistema mecánico.
- Tienen impacto y consecuencias fuertes en daños económicos, humanos, ambientales, sociales y jurídicos.
- Ocurren en sistemas creados por el hombre.
- Cuando sucede un siniestro sus características y comportamientos puntuales son siempre desconocidos.
- Todo sistema contiene siempre una cantidad X de posibles fallas internas, con potencial o no, para desencadenar un siniestro.
- Todo siniestro es un suceso único, diferente de cualquier otro.

Esto es todo, o casi todo, lo que se sabe de un siniestro cuando ha acontecido. El resto, su proceso de desarrollo único, es objeto de investigación y análisis.

4. FALLAS MECÁNICAS

4.1 ¿Qué es una falla mecánica?

“Falla es un evento que ocurre al interior de un producto, proceso, componente o sistema que hace que este salga abrupta o paulatinamente fuera de servicio. Las fallas pueden ser causadas por agentes internos o externos”.²⁰

Para el autor de este trabajo, falla, en una tecnología, es toda acción, evento o comportamiento concreto: material, humano, mecánico o procedimental, que puede inducir a un funcionamiento insatisfactorio, o incluso al colapso, a un sistema o parte de este.

Falla mecánica, se llama a una falla o problema que se manifiesta en un componente físico de una máquina, instalación mecánica o en una dinámica física.

De nuevo, se remarca que las fallas mecánicas son las fallas visibles de un sistema determinado pero una revisión con más profundidad puede revelar que fallas silenciosas al interior de la operación pueden ser precedentes de ellas; por lo que, en materia de seguridad, se debe trabajar con fallas de sistema o de operación tecnológica, como se ha descrito antes.

²⁰ ACUÑA, Jorge. *Ingeniería de confiabilidad*. p. 20.

Como respaldo de lo que se expone, se cita lo ocurrido al transbordador espacial Challenger en 1986: la nave se desintegró a solo 73 segundos después de su lanzamiento, debido a la falla de una junta tórica plástica (la falla mecánica visible). Un desastre de tecnología espacial en el que murieron los 7 tripulantes de la nave. Posteriormente, una comisión integrada para la investigación del siniestro, concluyó que la cultura organizacional de la NASA y el sistema de toma de decisiones habían contribuido, sustancialmente, al accidente.

El informe también concluyó que la agencia espacial debía revisar por completo su forma de operar para evitar errores similares en el futuro y pidió que los cohetes propulsores del transbordador espacial fueran diseñados de nuevo.

El accidente del Challenger ha sido utilizado como caso de estudio en muchas discusiones sobre ética y seguridad en ingeniería.

4.2 ¿Cuándo y dónde pueden ocurrir las fallas?

Puede decirse que las fallas son universales. Con seguridad, estarán presentes en todo sistema diseñado y construido por el hombre. Pero esto no debe ser tomado, tajante, como una afirmación catastrófica y conformista; ante el infortunio, junto a la sentencia anterior, se debe agregar que para que sus efectos sean perceptibles e importantes, estas fallas o, mejor dicho, sus interacciones, deberán desarrollarse mediante un desencadenador hasta un punto en que se manifestarían en un accidente o siniestro. Contra ese desarrollo es la batalla de la ingeniería.

De acuerdo a lo anterior, el sistema de fallas dentro de un sistema debe estar bajo control permanente. De hecho, así ha sucedido en algunas

tecnologías como la de aviones, en las que el estudio de fallas causantes en desastres ocurridos, ha permitido, en el tiempo, el diseño de mejoras que hacen más segura su operación. Aunque pueda parecer grotesca la expresión, por lo sensible de la temática, debe decirse que es una especie de curva de aprendizaje.

A manera figurativa, en los sistemas mecánicos, las fallas son como semillas de las que, bajo ciertas condiciones, puede brotar una planta desastrosa.

4.3 ¿Cómo surgen las fallas en la tecnología?

Las fallas van quedando alojadas en los sistemas desde el inicio, desde que estos comienzan a ser diseñados y por todo el recorrido de proceso seguido hasta que un sistema llega a estar construido y durante toda su vida en funcionamiento. En cada paso, nuevas fallas van adicionándose al sistema.

Los cálculos en ingeniería son siempre unas aproximaciones, bien estudiadas y cuidadosas, pero finalmente, contienen siempre algún grado de incerteza. En cuanto a los materiales utilizados, no existe el material absolutamente perfecto; los átomos mismos, en su ordenamiento al interior de los materiales, manifiestan imperfecciones que difícilmente pueden ser controladas. Se trabaja con pruebas de resistencia y comportamientos promedios.

Los procesos de fabricación en metal mecánica son fuente también de otras incertezas y fallas posibles. Los elementos de fijación y procesos de ensamble, las mediciones y alineaciones hasta llegar al montaje de todo el sistema. En todas las etapas, aun siendo ejecutadas por personal experto en cada cosa, siempre habrá imperfecciones.

Cosa igual sucede a partir del momento en que un sistema comienza su operación y durante toda su vida útil. En la parte no sólida de una tecnología: procesos, mantenimiento, selección del personal, su capacitación y entrenamiento, anticipación de incidentes, controles, decisiones administrativas relacionadas. Se sabe que las fallas están ahí.

Se puede pensar que es similar a como sucede en el ambiente o en el cuerpo humano, donde, aunque no se pueden ver, se sabe que se está rodeado de microorganismos, bacterias, que tendrían un poder devastador si se permitiese que se formase el ambiente propicio para su ataque, pero que, mientras esto no sucede, todo va bien, ni siquiera llegamos a recordar que están ahí.

4.4 Fuentes comunes de fallas mecánicas

Existen unos temas causantes de fallas bien definidos que sirven a los ingenieros mecánicos como parámetros de diseño y como comprobación de muchos tipos de fallas desarrolladas. Estas categorías de fallas pueden aplicarse en cualquier tipo de maquina o sistema mecánico.

Errores de diseño; falla de materiales; deficiencias en procesos de fabricación; deficiencias y errores de montaje; fatiga; corrosión; desgaste; falta de o deficiente mantenimiento; condiciones de trabajo distintas o sobrepasadas a las condiciones de diseño; operación no calificada, indebida o imprudente; agentes externos.

4.4.1 Errores de diseño

Los elementos a tomar en cuenta en el diseño de máquinas y elementos de máquinas son muchos y en conjunto constituyen el diseño total que dará realidad a una máquina o sistema. Estos aspectos van desde la geometría de cada elemento, el material de que será fabricado, la cinemática de las piezas móviles, las cargas a que serán sometidas, consideraciones de la fricción, la forma o tecnología con que será ensamblado, consideraciones de vibración y de montaje, y aún otros aspectos más.

Todo este proceso constituye el diseño de elementos, máquinas e instalaciones. Cualquier aspecto no considerado adecuadamente u obviado, puede dar lugar a debilidad en el diseño final y, por tanto, del componente o máquina producida que, luego, en pleno funcionamiento real, pueden comenzar a aparecer las consecuencias de esas posibles deficiencias u errores.

Se debe recalcar que, como todo proceso humano, a pesar del aprendizaje y esfuerzo continuo, el diseño no ha estado y no puede estar libre e inmune a la ocurrencia de fallos.

4.4.2 Errores o deficiencias de fabricación

Los procesos mediante los cuales son fabricados los componentes mecánicos, del mismo modo, son sujetos de imprecisiones y desviaciones. Esto puede resultar en incrustar debilidades ocultas de las piezas en funcionamiento y, de igual forma, constituirse en origen de fallas de máquinas. Sin embargo, los avances en tecnología, controles y métodos de pruebas, reducen la ocurrencia de estos fallos para hacerlos competitivos y confiables a las aplicaciones de las necesidades actuales de las sociedades y la civilización.

Un ejemplo típico de este tipo de procesos es la soldadura que involucra aportación de material (electrodo) y unas altas temperaturas concentradas en la zona de proceso que pueden ocasionar distorsiones en la resistencia del material en las áreas y líneas de unión, provocando que las piezas unidas cambien su comportamiento y resistencia ante determinado tipo de cargas. Tuberías conductoras de vapor unidas por soldadura son un ejemplo de este tipo de proceso que requiere extremo cuidado, técnica depurada y control en su ejecución. Se recalca en este punto que, para piezas críticas, por ejemplo, de maquinaria industrial, también los procesos bajo los cuales algunas veces son fabricadas, deben ser diseñados y no dejarlos a descuido o experiencia empírica de operarios y talleres que bien pueden no comprender a fondo lo que está en juego.

4.4.3 Deficiencias y errores de montaje

Se refiere a los procesos de construcción del sistema en el espacio donde va a funcionar (cuando se trata de un sistema sin desplazamiento). Durante el montaje los proyectos van ya tomando forma hasta llegar a ser concluidos. En este proceso, cimentaciones, anclajes, fijaciones, aprietes, ajustes, niveles, verticalidades, alineaciones, entre otros, deben ser realizados con extremo cuidado a fin de evitar distorsiones o surgimiento de fallas prematuras e imprevistas del sistema. De nada serviría un buen diseño, si el montaje no concuerda en cuidados y meticulosidad.

4.4.4 Fatiga

Sin importar el tipo de material de que se trate, aún los aceros más resistentes, al ser sometidos a un trabajo continuo, particularmente aquellos elementos que trabajan con cargas dinámicas fluctuantes, en el tiempo, llegan a

debilitarse y experimentarán cambios en su estructura interna hasta llegar a producirse una fractura. Este efecto natural de los materiales y de los metales en particular, es considerado por los ingenieros diseñadores, sabidos de los ciclos de trabajo que esperan a las máquinas. De ahí, las piezas y las máquinas no son eternas y son especificadas para trabajar confiablemente durante un período de tiempo calculado. Esta fractura o rotura del material puede presentarse aún bajo una carga menor que la resistencia normal del material lo que convierte a este fenómeno en altamente peligroso.

4.4.5 Desgaste y deformaciones

Por desgaste entenderemos una disminución muy pequeña en las dimensiones de una pieza, posiblemente ocasionada por efecto de roce continuo con otra pieza o con otros materiales de trabajo; deformación es cualquier variación geométrica respecto de la forma original de una pieza. Esta puede producirse por cargas continuas en el tiempo, por sobrepasarse la capacidad de carga de la pieza, por desbalance de cargas o por desalineaciones en el sistema.

Ambos efectos pueden, a su vez, llegar a reducir las capacidades reales de resistencia de un componente o a producir vibraciones indeseables y peligrosas en una máquina o sistema.

4.4.6 Falta de mantenimiento o mantenimiento deficiente

El mantenimiento es la función de cuidar de los sistemas mecánicos en operación para que permanezcan en estado normal de operación durante la mayor cantidad de tiempo posible. En muchas ocasiones, sin embargo, la ejecución de trabajos puede contener errores que agreguen más puntos débiles

y hasta críticos a la geografía de fallas del sistema. En otros casos, por razones diversas, pueden obviarse rutinas diseñadas que luego se convierten en una debilidad más del sistema. El trabajo de mantenimiento es de suma importancia no solo para conservar equipos funcionando sino porque parte de ese trabajo estará destinado a evitar accidentes.

4.4.7 Cargas de trabajo sobrepasan especificaciones

Operar un equipo o someter un sistema a una carga superior a la carga para la que fue diseñado, aunque solo sea por tiempos cortos, supone un riesgo que puede desembocar en un accidente, obviando el resto de condiciones que pudieran haber estado bajo control.

Casos como este se observan con frecuencia, por ejemplo, en vehículos de transporte de carga (picops, camiones, trailers) cuando son sobrecargados, haciendo que sus parámetros físicos como inercia y centro de gravedad cambien; así también, las exigencias y respuestas mecánicas cambian drásticamente.

4.4.8 Operación no calificada

Se habla de operación no calificada cuando un sistema o tecnología es puesto bajo operación, responsabilidad y control de personal que no ha recibido una instrucción y capacitación necesaria para ello. Es muy probable que el personal asignado no sabrá interpretar condiciones extrañas, datos, eventos que pudieren ocurrir durante la operación y tampoco sabrá cómo reaccionar ante estas posibles ocurrencias y casos muchos hay en que además de lo anterior, quizá intervienen en algún punto con una medida completamente

inadecuada o hasta contraproducente para la funcionalidad o la integridad del sistema.

4.4.9 Agentes externos

Adicional a los anteriores, pueden ocurrir eventos o intervenciones provenientes del sistema externo al sistema bajo control. Golpes, temperaturas extremas, arenas incrustadas, afectaciones por lluvias que se filtran, acción de animales, entre otras. Todos estos son factores que pueden, en determinados casos, ocasionar el desarrollo de fallas tempranas por causas externas al sistema mecánico bajo control.

4.5 Relación fallas mecánicas y siniestros

Hay acuerdo general, en el ambiente ingenieril y entre los estudiosos de la accidentalidad, en que las fallas que existen en los sistemas, al desarrollarse o al interaccionar unas con otras, son las causantes de accidentes de diversas magnitudes, entre ellos, los que nos ocupan en este trabajo. Fundamentalmente, se afirma que las fallas mecánicas y el error humano representan un riesgo latente de la ocurrencia de accidentes. De ahí, la importancia y el interés por estudiar cómo, dónde y cuándo se producen estas, así como analizar, cuando un accidente lamentablemente se haya presentado, en qué consistió la falla que le dio origen y por qué pudo suceder.

En tecnología mecánica, un sistema ideal sería uno sin la presencia de fallas, tal sistema o mecanismo, desde luego, no existe. Por el contrario, se puede afirmar, con mucha evidencia física e histórica, que con cada sistema tecnológico creado y operado un conjunto de fallas sistémicas existe también y que un sistema de fallas es un sistema productor de accidentes en potencia.

4.6 ¿Cómo se puede lidiar con las fallas?

Una vez queda visto que las fallas, con toda certeza estarán incrustadas en los sistemas tecnológicos, se presentan varias interrogantes. ¿Todas las fallas producirán accidentes? ¿Es todo tan malo? ¿Qué hacer para mantenerlas bajo control? ¿Se puede hacer algo para evitar los accidentes?

Lo positivo es, en primer lugar, que ya se sabe que están ahí. Por tanto, no debería ser ninguna sorpresa. Materiales que, según el tipo de pieza y geometría, estarán sometidos a distinto tipo y magnitud de cargas que significan diferentes cercanías o lejanías al punto de falla; elementos que estarán más susceptibles de fatiga que otros; software que puede ser sensible a comportamientos alterados repentinos por diversas causas como temperatura, polvo, vibraciones, y otros; personal que puede tener diferentes niveles de habilidades y hasta de capacidades de reacción; criterios de tiempo entre recambios, calidades, y muchas otras posibilidades. La verdad es que las fallas se pueden alojar en muy diversas formas y permanecer sin ser detectadas durante mucho tiempo en un sistema tecnológico en operación.

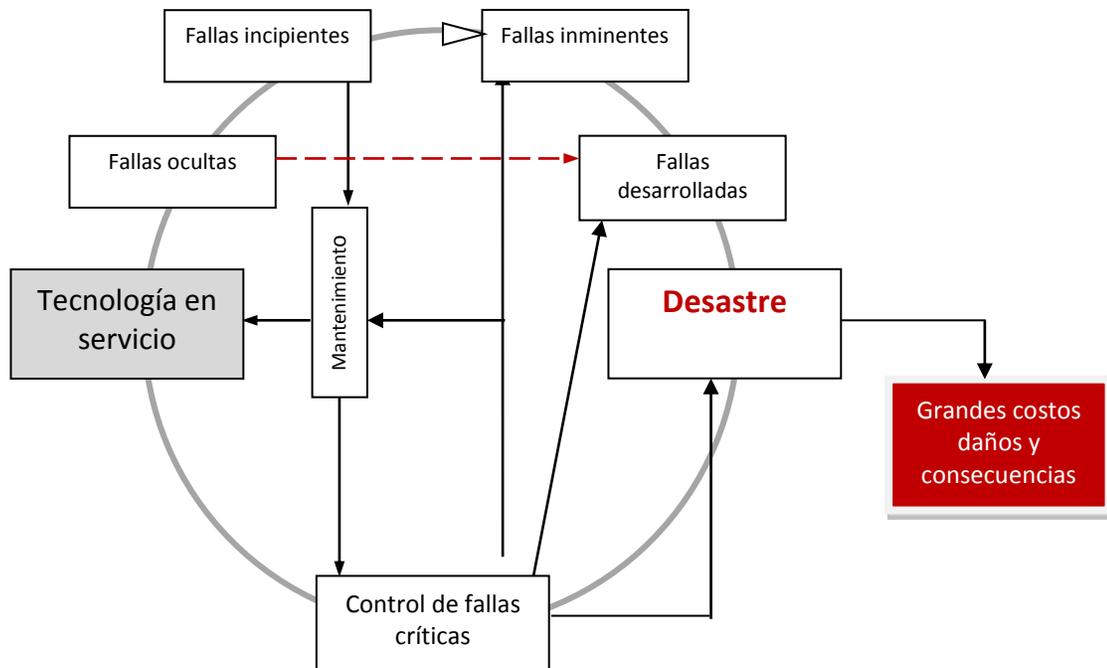
Significa un proceso aparte diseñar, establecer y mantener un control adecuado para evitar que causen daños, pero es lo que hay que hacer en el ámbito de la seguridad.

Se menciona, por ejemplo, que así es como se ha actuado en la industria de la aviación. La tecnología de aviones es, por mucho, el medio de transporte más seguro de que se dispone hoy en día, y la manera de afrontar el problema ya sabido se puede describir como: brindarle opciones al sistema.

Un avión puede experimentar falla repentina de un motor, por ejemplo, y no habrá riesgo fatal en el vuelo por esa falla. Una realidad totalmente contraria

la podemos identificar en la elevada tasa de accidentes y sus repercusiones en el tránsito en ciudades y carreteras. Se puede concluir que el sistema no está dotado de opciones de alivio diseñadas para momentos críticos. En las ciudades los criterios prevalentes son de diferente naturaleza con sus resultados de accidentalidad asociados.

Figura 10. **Esquema de gestión de fallas mecánicas**



Fuente: elaboración propia.

Con el propósito de mantener centrado el tema de este trabajo no se profundiza más en este tema; pero en la figura anterior (figura 10) se muestra un esquema que puede orientar un programa de control de fallas. En este, se sugiere una unidad especializada en el trabajo de ataque o neutralización del

sistema de fallas dentro de un sistema tecnológico. Esta unidad es de objetivos y habilidades completamente distintos de un departamento de mantenimiento. Este último está enfocado en salvaguardar la producción; mientras el propuesto está enfocado en la seguridad, en un concepto anti siniestros.

Se debe insistir en que los sistemas tecnológicos son, al mismo tiempo, sistemas de fallas en potencia y que se necesitan criterios bien dirigidos y definidos para diseñar soluciones efectivas de prevención de accidentes.

5. ANÁLISIS DE SINIESTROS

Específicamente, se trata sobre cómo investigar fallas mecánicas bajo condiciones de siniestro. Que no es lo mismo que buscar fallas de componentes o piezas falladas en estado de calma, sin repercusiones y con la pieza o componente completamente disponible para su examen o reemplazo.

En un siniestro no se sabe siquiera si ha sido un componente mecánico sólido el protagonista principal de la falla desarrollada. Puede haber sido un procedimiento, una operación, una decisión, una circunstancia.

Analizar un siniestro significa realizar el trabajo ingenieril: teórico, de campo y probatorio, que lleve a comprender la mecánica que le dio origen. Tratar de responder técnicamente, con fundamento teórico y evidencias a la pregunta ¿cómo sucedió esto?

Ahora se entiende un siniestro como dos cosas: un proceso de fallas activo y un producto, salida o resultado físico de ese proceso.

5.1 Un sistema de fallas actuando

Antes se ha dicho que la tecnología, en este estudio, se comprende como un campo mayor de una funcionalidad mecánica y que existen fallas dentro de ese sistema que no se encuentran en la parte tangible (las máquinas e instalaciones) de esa tecnología mecánica, sino en la parte intangible, conceptual, procedimental y de la condición humana (juicio, claridad, motricidad, entre otros).

Unas y otras, conforman un sistema de fallas que coexiste con nuestro sistema tecnológico físico. Este sistema de fallas actúa en todo momento y atenta contra el equilibrio físico que conforma la parte medular de la tecnología bajo análisis.

Las fallas, en lo individual, pueden ser interpretadas como partículas que bombardean los sistemas, erráticamente; sin embargo, la acción de una sola de ellas que lograre llegar hasta el centro de equilibrio físico del sistema, tendría el potencial de hacerlo colapsar. Es lo que finalmente se ve en un siniestro.

Toda tecnología mecánica, final y conceptualmente, se reduce a eso, a una configuración de variables físicas puestas en equilibrio controlable, mediante un conjunto de piezas y mecanismos. Vehículos mantenidos en movimiento de trayectorias fijas sobre rieles, como los trenes de alta velocidad; contenedores con la capacidad de desplazar grandes cargas en vuelo por el aire, sin caer por efecto de la gravedad, como los aviones; presión de vapor de agua contenida para diversos fines, como las calderas, y muchas otras. Se trata siempre de física.

El potencial mayor del sistema de fallas, o quizá mejor sea dicho, la debilidad mayor de un sistema tecnológico se ubica y se identifica como la configuración de equilibrio físico establecida para cada tecnología en particular. Ese es el núcleo a proteger para evitar el mecanismo de colapso a que está sometido un sistema en medio de una atmósfera o sistema de fallas. Cada siniestro ocurrido es una derrota para la ingeniería en este cometido.

Se pretende, aquí, a partir de un evento siniestral, deducir qué tipo de falla y cómo logró penetrar para atacar el sistema tecnológico, en su soporte físico

medular, que causa el colapso que consiste en el rompimiento del equilibrio físico y que conocemos como un accidente.

Es muy importante, desde este momento, enfatizar que la finalidad de una investigación profesional de ingeniería de este tipo, es solo una: determinar, lo más fehacientemente posible, lo que ha ocurrido; no determinar culpables de cosa alguna. La misión de la ingeniería humana es idear, crear y mejorar tecnologías.

A diferencia con lo propuesto en otros trabajos, en este modelo de investigación planteado no se parte de evidencias del accidente, sino de un equilibrio físico conocido y una geografía de fallas críticas de la tecnología particular con que estemos tratando.

5.2 Geografía de fallas críticas

Entre el universo de fallas que pueden existir al interior de un sistema de funcionalidad mecánica, algunas de ellas actuarían en línea directa hacia la ingeniería de sustento fundamental de la tecnología mecánica en cuestión. Esas fallas, por simples que pudieren parecer, tendrían el potencial de provocar un accidente grave. La identificación del lugar o proceso de dónde pueden proceder, puede llamarse: geografía de fallas críticas del sistema.

A partir de una formulación de equilibrio físico conseguido mediante dispositivos creados por la ingeniería, se tendrán claramente identificadas las variables críticas de una tecnología dada. A partir de ellas, se seguirá la pista de los diferentes procesos, mecánicos, operativos y de control que desembocan directamente en esas variables. Esto determina un cuadro que se puede llamar la geografía de fallas críticas del sistema. Contiene aquellas fallas que, potencialmente, tendrían la capacidad de hacer colapsar el sistema.

5.3 En materia preventiva

Identificar y ubicar fallas será la adopción de un trabajo no convencional de ingeniería: la protección de la tecnología ante una atmósfera de fallas actuando. La ingeniería diseña máquinas, instalaciones, sistemas, funcionalidades. En general, diseña sistemas deseables; ahora, según se ha venido observando en el desarrollo de este trabajo, existe un sistema no deseable al acecho; es manifiesto a través de las fallas presentes y, en los casos más negativos, en siniestros.

La ingeniería emplea la física como: velocidades, presión de líquidos y gases, fuerzas de sustentación, flotación, resistencia estructural de cargas, transformación de energía, impulso mecánico, y otras, y crea con esos elementos sistemas útiles, convenientes, deseables. Pero el sistema de fallas aparecerá de forma intrínseca y, eventualmente, puede actuar sobre la configuración física diseñada.

Una caldera es una tecnología mecánica que utiliza la física de la presión de vapor de agua para sus aplicaciones prácticas en diversas industrias. Intrínsecamente, para una caldera: existirá un sistema de fallas que atentarán romper la contención de la presión. El diseño de estos artefactos, entonces, no estará completo sino hasta que se agregue la geografía de fallas críticas, y los diversos procesos de falla que pueden atacar el punto central de la tecnología de la caldera.

La seguridad no debe descansar en recomendaciones ni mecanismos aislados de prevención, sino en diseño de sistemas de ingeniería con una geografía de fallas críticas prevista y escudo protector recomendado contra esas fallas críticas.

Quizá se puede apreciar un poco de eso en la tecnología de aviones, en la que, el aprendizaje de experiencias negativas tempranas, abrieron el camino para la agregación de elementos que responden de inmediato a abruptas e imprevisibles salidas de normalidad de sus componentes identificados como críticos y vulnerables.

Estos, provienen de nuevos análisis y diseños de ingeniería, de tal modo que perder un motor, perder un generador eléctrico, computadores de control de vuelo, incluso la falta de combustible en un momento dado, representan solo un peligro muy disminuido. Resultado actual: 1,75 accidentes por millón de vuelos. Esto ha convertido a los aviones en la forma más segura de viajar sobre el planeta (a pesar de que aún suceden accidentes impactantes).

En lo que sigue, se trata de construir una metodología de investigación estructurada que pueda ser seguida como guía para analizar cualquier tipo de siniestro que involucre tecnología mecánica, basada en el concepto de geografía de fallas críticas.

5.4 Contenido de una investigación o análisis de siniestro

Una investigación para determinar las fallas actuantes que produjeron un siniestro, vista como un proyecto, estaría conformada con los siguientes elementos.

- Datos iniciales
- Imagen o visualización del siniestro
- Pregunta inicial de ingeniería
- Ingeniería fundamental de la tecnología siniestrada
- Cuadro de hipótesis (ubicación teórica de fallas críticas)

- Planificación de la investigación y presupuesto
- Organización
- Investigación de campo para recabar evidencias
- Informe de investigación y diagnóstico

A continuación, una breve descripción de cada uno de ellos. El enfoque principal será mostrar cómo se obtienen las hipótesis y su confirmación o descarte durante la investigación de campo.

5.4.1 Datos iniciales

Obtener una primera información o relato elemental de lo ocurrido: qué tipo de tecnología sufrió el accidente y en términos simples y generales en qué consistió el mismo. Por ejemplo, escucharíamos expresiones como: un avión se accidenta. Cae a tierra o un avión se estrella en tal lugar. Esta información elemental inicial sería como la casilla de inicio de un proceso de investigación. Se necesita saber también en qué lugar ocurrió el accidente, la fecha en que ocurrió y si hay o hubo personas lastimadas o fallecidas. En muchos casos la investigación puede estar siendo solicitada algún tiempo después de ocurrido el accidente, con lo que también pueden estar disponibles algunas fotografías para obtener una primera visualización del suceso a investigar.

5.4.2 Imagen inicial del siniestro

En un escenario de siniestro, el aspecto físico puede ser desalentador. No se parece a nada que haya sido diseñado así, por lo que no lo podemos comprender de primera vista. El cuadro funesto de una bodega incendiada; los restos de un avión que se precipitó a tierra; unos autos deformados o hasta irreconocibles que han colisionado en una calzada; los entrehierros de una

caldera que explotó, y otros muchos casos. Nada parece guardar lógica. Pero, en este tipo de investigación, ese es el material de entrada. El punto de partida para un ingeniero investigador de fallas.

5.4.3 Pregunta inicial de ingeniería

¿Cómo pudo, ese resultado o producto desastroso que se ve, ser producido? Es, en cierto sentido, algo como diseñar el siniestro. ¿Qué proceso físico-mecánico debería cumplirse, al interior del sistema, para producir ese resultado?

Como se puede ver, no aplican aquí los métodos de prueba de formas de fallas en piezas de máquina que tantas veces se exponen en diversos trabajos. Se necesita llevar otro cause de investigación distinto. Es un reto para la ingeniería determinar, ante este tipo de escenarios, cuál es el proceso que los ha producido, pero, puesto que ahí está su evidencia, debe haber un proceso, una secuencia de eventos físicos (mecánicos o energéticos) que, de forma involuntaria, inconsciente y totalmente fuera de control alguno, se ejecutó. ¿Cuál es ese proceso?

Por ejemplo, si el siniestro que se analiza es la explosión de una caldera, la pregunta fundamental de ingeniería sería, si se quisiera ejecutarlo conscientemente, ¿cómo se haría explotar una caldera con la propia mecánica de la caldera? Es decir, sin intervención de medios externos. ¿Cómo se rompería su normalidad operativa, hasta llevarla a explotar, en un momento dado?

La respuesta a esta pregunta es, más o menos simple: produciendo una falla de presión (sobrepresión).

5.4.4 Ingeniería fundamental de la tecnología siniestrada

Todo aparato, máquina, instalación, edificación en nuestras tecnologías mecánicas creadas para diversos fines, ha sido construido mediante un diseño de ingeniería para una funcionalidad normal esperada. Ese mismo diseño es el que habrá de usarse para teorizar una alteración, mediante una falla, en uno o más puntos posibles que resultarían en un funcionamiento instantáneo distinto.

A manera ilustrativa, el caso simple de una barra sólida de acero, de sección circular que hubiese sido diseñada, para algún propósito en un sistema, para trabajar soportando una carga de compresión axial, estática " P_{max} ". Seguramente, el diseño de ingeniería es simple y corresponde con un elemento sometido a compresión cuyo diseño sería calcular el esfuerzo a que estará sometida la pieza, y, como todo proyecto de ingeniería, afectar el resultado con un factor de seguridad. Esto daría un esfuerzo o resistencia de diseño con el cual seleccionaríamos el material para fabricar la barra.

Se sabría todo el tiempo como funciona la barra en su posición de trabajo, porque ha sido diseñada completamente: diámetro, longitud, sección, resistencia del material a la fluencia bajo esfuerzos de compresión, en un ambiente no agresivo, entre otros aspectos.

Pero un día, en algún momento de trabajo, bajo circunstancias inciertas, la barra ha fallado y ha quedado inutilizable para el trabajo y con ella otros componentes que dependían de su estabilidad. Ha ocurrido una falla mecánica, se dice; un accidente.

Conociendo la ingeniería de una barra bajo carga de compresión (un ejemplo muy simple, desde luego), de inmediato el ingeniero investigador se

plantea: falló la carga, falló la resistencia o falló el factor de seguridad. (habría varias maneras de desarrollar esas fallas en esta aplicación de la barra. Aquí se incursiona en la ingeniería de lo anormal que sustenta este trabajo).

Cuando algo como lo descrito ocurre en una aplicación de ingeniería se puede estar seguro de que algo cambió en el sistema, en algún momento, e hizo que se perdiera la condición de equilibrio diseñada: ¿qué cambió?, ¿por qué cambió?, ¿quién o qué intervino?, ¿cuál fue el proceso que siguió el cambio?

Toda acción dentro del sistema que pueda afectar directamente a una o más de las variables debe ser objeto de investigación de campo. Tanto si se trabaja en modo preventivo como si se investiga un accidente ocurrido.

5.4.5 Cuadro de hipótesis (procesos hipótesis)

La ingeniería concerniente a la tecnología accidentada, sin duda, llevará al planteamiento de varios procesos posibles que luego, mediante el cuadro de evidencias encontradas del accidente real, lo hará coincidir, claramente, con alguno de los procesos hipótesis. Es como un molde que sirve de comparativo para las evidencias que luego se intentará encontrar en el sistema. Pero ahora se sabe qué se busca.

Para terminar con el ejemplo anterior ¿Cuáles serían esas posibles anomalías que, en algún momento dado, podrían causar el colapso de la barra?

- Haber seleccionado mal el material (en una tabla de proveedor, por ejemplo).

- Haber comprado material equivocado o no garantizado (con una resistencia menor a la calculada).
- Una sobrecarga que pudiera ser inducida de algún modo (quizá una decisión de alguien sin conocimiento ingenieril).
- Fabricar (por error humano) la pieza real con un diámetro menor del especificado en el diseño original lo cual haría que en trabajo la pieza fallase a una carga inferior a la calculada.
- Usar un material ya usado previamente en alguna otra aplicación, que se encontró en una bodega, para ahorrar algún costo.
- Introducir una falla de montaje (alineación incorrecta respecto de la carga, por ejemplo).
- Una sobreconfianza en un cálculo repetitivo de un ingeniero pudo hacerle no revisar el cálculo y quizá, inadvertidamente, ingresó mal un número en los cálculos.

En cuestión de siniestros, lo impensable puede pasar.

5.4.6 Planificación y presupuesto de la investigación

Dependiendo del caso, y de las hipótesis derivadas de la pregunta fundamental planteada en la sección anterior, una investigación cubrirá varias (o quizá todas) las áreas relacionadas que se listan a continuación (dependiendo del caso pueden plantearse otras áreas). Recordando, además, que como en todo proyecto de ingeniería, debe buscarse un equilibrio de eficacia, rapidez y costos.

- Equipo o sistema siniestrado y área de siniestro (materiales, piezas, marcas, configuración, año de construcción o fabricación, planos, otros.).

- Documentación (datos) del proceso o carga que se ejecutaba al momento del accidente.
- Historial de mantenimiento y cambios de piezas o componentes más recientes.
- Sistema de control de fallas (o historial de fallas; si existe).
- Testimonio de personas (sobrevivientes u observadores directos del desastre).
- Grabaciones del sistema (medios audio visuales, si existieren).
- Reportes ambientales y climáticos.
- Revisión de casos similares ocurridos (en el mundo).
- Personal operativo (tiempo de operar el equipo, si hubo cambios de personal, hrs trabajando de continuo, entre otros).
- Protocolo, comunicación y línea de información y decisiones.

Una investigación del tipo que abordamos en este trabajo, debe ser considerada como un proyecto de ingeniería. Como tal, debe ser objeto de una planificación profesional a fin de que no resulte en un trabajo incongruente, disperso, ineficiente y desenfocado y, principalmente, que alcance el resultado buscado en el menor tiempo posible.

Entrar a discutir los pormenores de una buena planificación, sale del alcance de este trabajo, pero se insiste en que el investigador debe ser un buen planificador, de lo contrario, la investigación corre un riesgo alto de no llegar a buen término o de llegar a resultados de baja fiabilidad o imprecisos.

La planificación debe incluir: qué se va a realizar, en qué orden, quién es el técnico o persona idónea para encomendarle tal tarea (generalmente será necesaria la participación de personas conocedoras o experimentadas en materias particulares), qué recursos y equipos serán necesarios, costos en que

se incurrirá (se realizará un presupuesto), duración de las actividades, tareas dependientes, plan de contingencias, apoyos y permisos necesarios, medidas de seguridad.

Luego de la planificación, es absolutamente necesario (como lo es en cualquier proyecto) elaborar un presupuesto de proyecto. Este debe reflejar claramente las etapas, los recursos y, desde luego, los costos que supondrá la investigación hasta concluir en un diagnóstico o informe de ingeniería. Debe ser tenido en cuenta que este documento, generalmente, será de interés de personas que pueden no estar familiarizadas con terminología técnica y de ingeniería por lo que deberá ser expresado en términos más comunes sin descuidar ni obviar, la información técnica veraz del proyecto. Al igual que en el título anterior, esta fuera del alcance de este trabajo, profundizar sobre la elaboración de un presupuesto. Se ha mencionado aquí, únicamente con el propósito de recordar la parte administrativa y financiera de un proyecto de investigación.

5.4.7 Organización del equipo

Según el tipo de accidente y la tecnología de que se trate, generalmente, una investigación de siniestros requerirá, además del investigador profesional o director de investigación, la participación de otros profesionales para efectuar el trabajo en las diferentes áreas planificadas.

En este paso, una vez realizada la planificación, se trata de prospeccionar y designar las personas correctas para cada actividad o área planteada de la investigación. Es una actividad de suma importancia ya que de la habilidad, ética, capacidades y experiencia de las personas seleccionadas para formar parte del equipo dependerá mucho la eficacia del proyecto o las dificultades innecesarias que lo matizarán.

Se debe cuidar, además, de generar las directrices oportunas, determinar canales de comunicación, delimitar capacidades de decisión, manejo de documentos, etcétera. Es un proceso delicado que vale la pena tomarse el tiempo de realizar porque aquí comienza la construcción del éxito o el fracaso de cualquier proyecto. Lo problemática o lo fluida que será la ejecución.

5.4.8 La investigación de campo

Una vez todo lo anterior ha sido realizado, es el momento de iniciar la búsqueda real de las fallas que puedan evidenciar la ocurrencia de alguna de las hipótesis planteadas al inicio. Se seleccionan las fuentes o canales de investigación pertinentes según lo aconsejado por las hipótesis principales.

Se sabe ya en qué áreas y procesos buscar primero. Se tiene idea de qué cosas deben llamar la atención, aquellas que pudieron romper normalidades en la física y mecanismos críticos (establecido ya en el cuadro de hipótesis). Es buscar en un campo de fallas, las que apuntan a haberse conjugado o activado para producir el resultado que se está tratando de coincidir con una hipótesis basada en física a que hace referencia este método planteado de investigación.

Durante la investigación de campo, en cualquiera de los medios seleccionados y disponibles, tarde o temprano surgirán elementos, datos que, claramente, comenzarán a coincidir con alguna de las hipótesis planteadas.

5.4.9 El informe de investigación

El informe de investigación de siniestro es el documento que contiene las conclusiones a que llegó el ingeniero investigador (o el equipo investigador), acerca de cómo se produjo el accidente. Debe contener toda la información

recabada, la fundamentación científica, las variables o circunstancias, las hipótesis y las conclusiones, así como las evidencias que las respaldan.

El informe es el producto final que recibirá un cliente o las partes interesadas, de tal modo que debe ser preparado con alta calidad profesional de modo que las conclusiones presentadas den satisfactoria y clara respuesta a las expectativas que la o las partes interesadas albergan.

La estructura y redacción del informe debe ser analizada profesionalmente a fin de elaborar un producto efectivo y confiable; este cometido queda fuera del alcance de este trabajo; no obstante, a modo de sugerencia inicial, se plantean las siguientes generalidades y estructura.

5.4.9.1 Generalidades

El informe de la investigación debería incluir, al menos, 4 secciones:

- descripción de la tecnología siniestrada
- descripción del siniestro
- descripción de la investigación realizada
- conclusiones y su fundamento.

El informe debe suministrar toda la información técnica que respalda las hipótesis consideradas y su fundamento, así como el proceso de descarte o eliminación de algunas de ellas hasta llegar a la hipótesis corroborada. Debe indicar, en términos simples y técnicos de ser necesario, cómo encajan las evidencias encontradas con la hipótesis aceptada. Además, deben anexarse todos los medios investigados: documentos, entrevistas, fotografías, videos y otros.

El lenguaje debe ser claro y debe evitar ambigüedades, duplicidades y contradicciones. Debe ser absolutamente técnico informativo e ingenieril. Debe evitar mostrar sesgos por opiniones personales de cualquier clase: culturales, religiosas, raciales, sexistas, nacionalidades, políticas.

En resumen, un informe de investigación de siniestro debe ser claro, ordenado, transparente, completo y confiable.

5.4.9.2 Estructura de informe sugerida

- La tecnología o sistema siniestrado
 - Descripción técnica de la tecnología siniestrada.
 - Características (capacidad de diseño, materiales estructurales, motorización, componentes o mecanismos críticos, procedimientos normales, etc.).
 - Principales mecanismos de operación y control.
 - Fecha de fabricación.
 - Tiempo de uso.

- Descripción del accidente
 - Sumario del siniestro.
 - Resultado observable del siniestro (estado final).
 - Hipótesis planteadas y su fundamento.

- La investigación
 - Fundamento físico y de ingeniería.
 - Fuentes o canales de investigación empleadas.
 - Evidencias encontradas.
 - Diagnóstico y fundamentos.

- Limitantes.

- Conclusiones (¿cómo se produjo el accidente?)
- Firma y sello del investigador responsable y fecha

6. CASO ILUSTRATIVO: ACCIDENTE DE UN AVIÓN

6.1 Datos iniciales

Un *Boeing 737 Max 8*, de la aerolínea *Ethiopian Airlines* se estrelló poco después de despegar de Adis Abeba, Etiopía, con rumbo a Nairobi, Kenia. Ninguno de los 149 pasajeros y 8 tripulantes sobrevivió al accidente. Fecha del accidente: domingo 10 de marzo de 2019.

6.2 Imagen o visualización inicial del accidente

Figura 11. Caso de avión siniestrado



Fuente: El País

https://elpais.com/elpais/2018/07/19/album/1531994457_358980.html#foto_gal_1. Consulta: 26 de junio de 2019.

La fotografía en la figura 11 muestra la magnitud del siniestro. Un avión es tecnología mecánica; por tanto, en investigación forense, es natural sospechar que, entre otras posibilidades, la causa que diera lugar a este suceso podría identificarse en algún componente mecánico. Se hace la salvedad, de que una investigación completa que tiene lugar para determinar cómo ocurrió un accidente de avión, es multidisciplinar y multipartita, y existen protocolos internacionales a seguir; en el contexto de este trabajo, sin embargo, el interés es mostrar cómo se determina y ejecuta, con fundamento científico y de ingeniería, una línea de investigación sobre posibles fallas mecánicas, como causantes del accidente.

Pregunta inicial de la investigación forense: ¿por qué se estrellaría un avión?

- Porque, por alguna causa, deja de ser gobernado por el piloto.
- Por fallas mecánicas
- Un atentado violento dirigido por extraños
- La acción repentina de un fenómeno natural

Un equipo de ingeniería forense, integral, deberá abordar todas las posibles líneas de investigación. Desde el punto de vista de la línea de ingeniería mecánica, se estaría interesado en los dos primeros posibles causales.

Delimitado el campo de búsqueda, se tratará cada una de las dos posibilidades como un problema a resolver.

- ¿Por qué podría un avión (mecánicamente) dejar de ser gobernado por el piloto?
- ¿Cómo puede un avión perder la sustentación para el vuelo?

Es un reto para la ingeniería determinar, ante este tipo de escenarios, qué fue lo que falló (si ese fuere el caso) mientras el avión estaba en vuelo e hizo que se precipitara a tierra.

6.3 Pregunta fundamental de ingeniería

Se sabe, como dato de entrada, que el suceso físico resultante fue que el avión cayó a tierra, luego, el problema de ingeniería es, determinar un proceso que pudiera, teóricamente, producir la caída del avión.

¿Cómo se puede precipitar a tierra un avión?; o en otras palabras: ¿qué haría a un avión perder, abruptamente, su capacidad de vuelo y caer a tierra?

6.4 Ingeniería y física de la tecnología siniestrada

La tecnología fundamental de aviones descansa en un núcleo físico: la fuerza de sustentación en el medio fluido aire, contrapuesta al peso, cuya fórmula para efectos prácticos, es: $L = 1/2 C_L \rho V^2 A$

Donde, C_L es el coeficiente de sustentación (depende del perfil de las alas y del ángulo de ataque σ); ρ es la densidad del aire; V es la velocidad relativa del aire (respecto del avión) y A es la superficie del sustentación.

La tecnología mecánica bajo análisis:

- Alas del avión
- Estructura general del avión
- Mecanismo del timón de profundidad
- Los controles del piloto en cabina

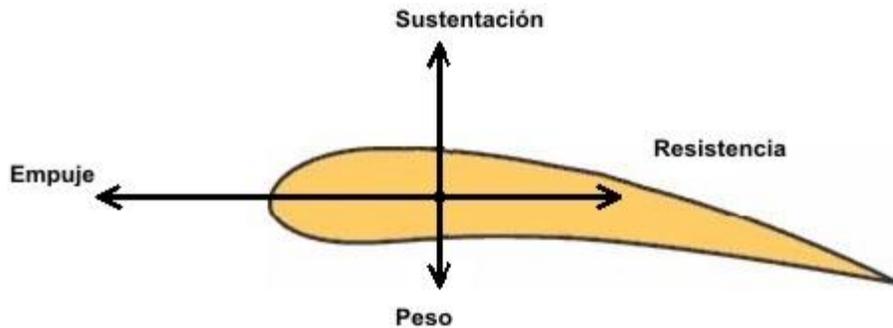
Un avión caería, abruptamente, a tierra por efecto de la gravedad (peso) si se pierde la sustentación. Por tanto, un sistema de fallas críticas debe ubicarse en cualquier cosa que pueda atentar contra la sustentación, a saber, según la ecuación dada para L : el ángulo de ataque, la estructura del avión, la velocidad y sus mecanismos de maniobra relacionados.

Los aviones vuelan por la acción de una fuerza conocida como sustentación, en dirección contraria a la fuerza de gravedad. Esta es producida al crearse una diferencia de presiones entre el extradós (parte superior de un ala de avión) y el intradós (parte inferior de un ala de avión) provocado por el perfil de las alas, y por el principio de acción y reacción de Newton.

En la figura 12 se representa un perfil de ala de avión y las fuerzas actuantes sobre un ala de avión.

La sustentación puede ser variada en vuelo por el piloto, mediante los controles de timón, que gobiernan unos mecanismos de timón, instalados en las alas y en la cola del avión, que permiten hacer correcciones en vuelo según las necesidades determinadas por el piloto. Principalmente el ángulo de ataque. Estos son los mecanismos de maniobra del avión.

Figura 12. **Fuerzas actuando sobre el ala de un avión**



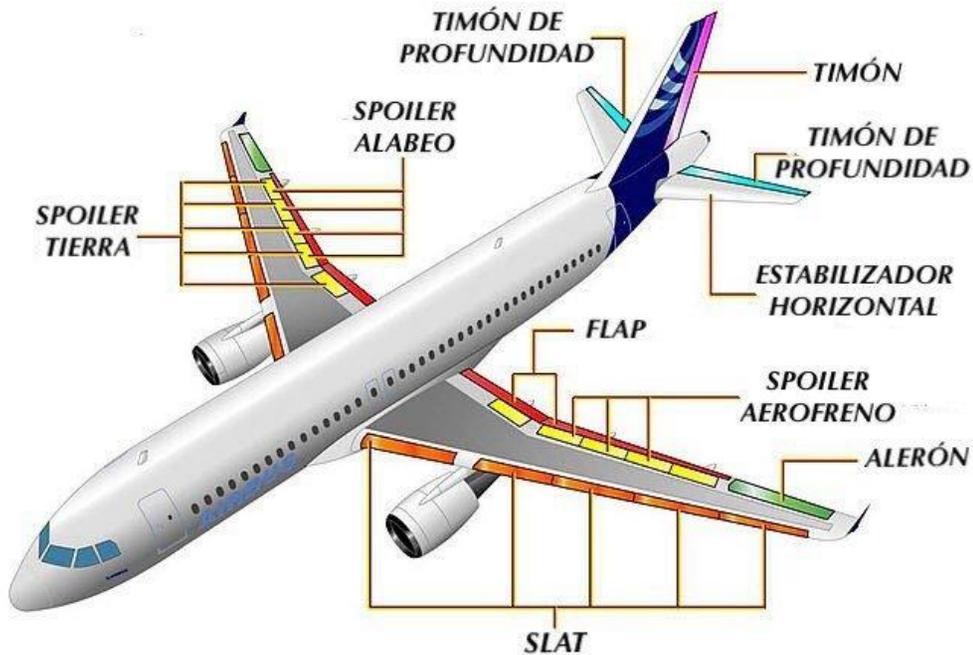
Fuente: Academic. <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/54184>. Consulta: 28 de junio de 2019.

En resumen, la sustentabilidad depende del perfil alar, de la velocidad, de la densidad del aire y del ángulo de ataque. De estos factores de la sustentabilidad, bajo posibilidad de maniobra del piloto hay dos de ellos: la velocidad y el ángulo de ataque.

Estos son los mecanismos de la tecnología del avión que le dan la sustentación. Un avión caería por efecto de la gravedad si, por alguna causa, perdiera la sustentación.

Un sistema de fallas que hubiere vulnerado el avión hasta hacerlo caer sin control a tierra, debe haber existido para producir el desastre. Esto, como se deduce fácilmente, sucedería si fallasen los mecanismos del timón de profundidad o los controles de que dispone el piloto en cabina, o, en caso extremo, si un ala se rompiera o se colapsara la estructura del avión.

Figura 13. **Timones de un avión**



Fuente: Airliners.net <https://pbs.twimg.com/media/CwXvmLwW8AA8LEI.jpg>
Consulta: 2 de julio de 2019.

En la figura anterior (figura 13) se puede apreciar la ubicación del timón de profundidad que, para el caso, es crítico ya que es el que permite los movimientos de subida y bajada de la actitud del avión; varía el ángulo de ataque.

Repasado esto, una falla con capacidad para hacer caer un avión a tierra, tuvo que estar asociada a una línea de falla grave del timón de profundidad (en la cola del avión) o del estabilizador vertical, los controles del piloto en cabina o la estructura del avión. Esto proporciona un cuadro de hipótesis, previo a iniciar la investigación de campo. Cualquier otra falla que no atentase contra la fuerza de sustentación no produce la caída del avión.

Cabe agregar un par de cosas más, respecto de la teoría básica de tecnología de aviones. Si al avión, por alguna causa, le fallara un motor, el

avión mantendría su capacidad de vuelo. Aún en el caso extremo y de muy baja probabilidad de que se quedara sin motores, el avión podría planear y aunque aterrizaría con dificultades, en condiciones alarmantes, podría evitar el caer sin control. El otro factor a mencionar es que, al incrementarse el ángulo de ataque (actitud de subida), la sustentación aumenta, solo hasta un cierto valor crítico del ángulo por sobre el cual un avión comenzaría a perder sustentación rápidamente.

6.5 Cuadro de hipótesis

- Rotura de un ala
- Alerones o slats averiados
- Mecanismos de controles en cabina averiados (trabados, rotura, entre otros.)
- Falla en instrumentos de control de vuelo
- Timón de profundidad roto o averiado
- Falta de combustible
- Fenómeno atmosférico
- Rotura o pérdida del estabilizador vertical (sobrecarga estructural)

6.6 Otras consideraciones pertinentes

Un avión cae por pérdida de la fuerza de sustentación. ¿Por qué el avión no planeó? Esto apunta con fuerza a dos posibilidades: al timón de

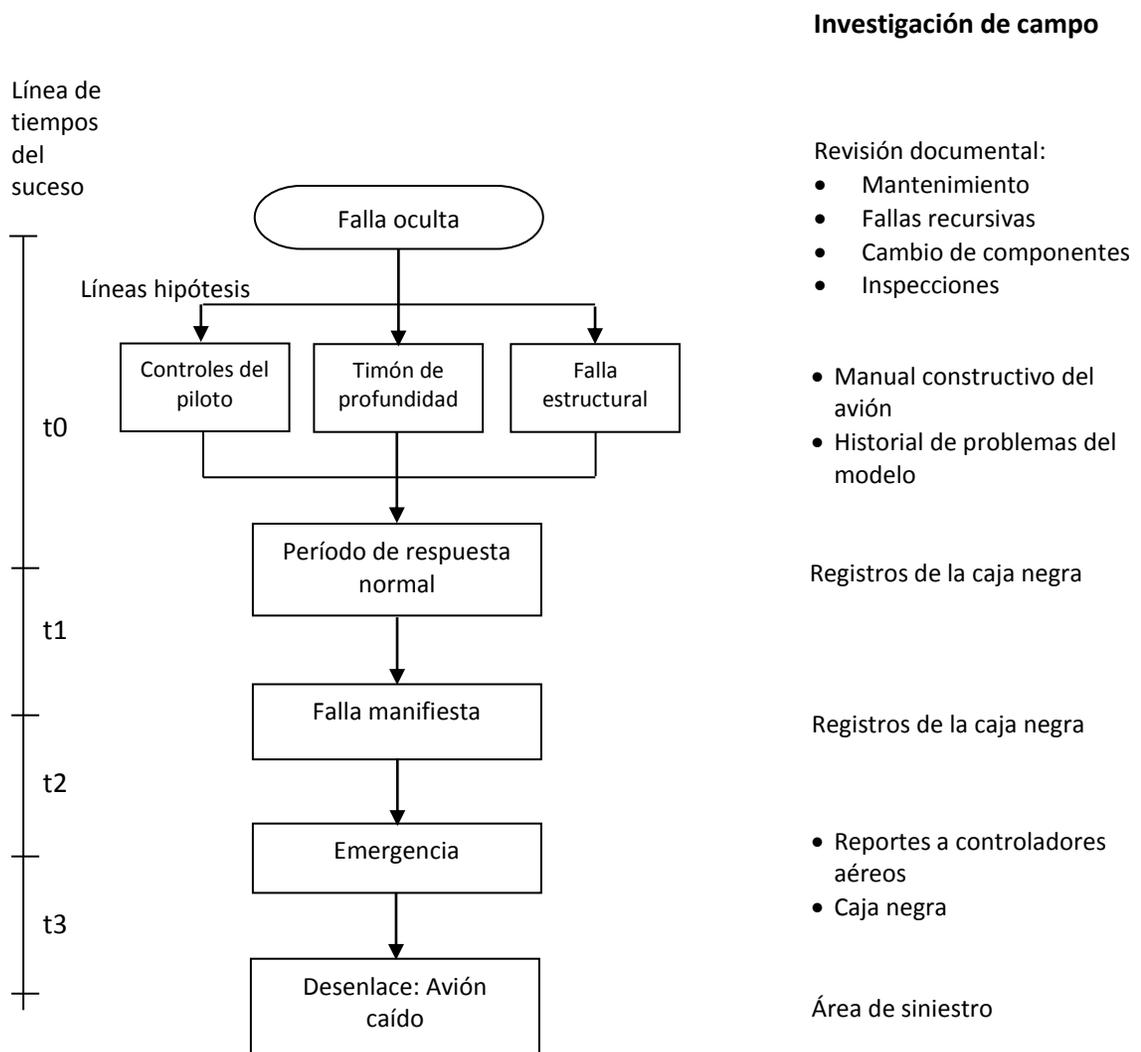
profundidad; posiblemente trabado o roto, o a falla en los controles del piloto, puede que no respondieran a una corrección del pitch del avión (movimiento arriba-abajo del morro).

Otra variable a considerar es el tiempo transcurrido de vuelo al momento del accidente. Sucedió en apenas 6 minutos del despegue. En ese momento el avión debió haber estado ya en condición de vuelo normal y si alguna falla absolutamente evidente y grave ocurría, existió un tiempo “t” de proceso de falla durante el cual debió haber reportes del piloto a controladores aéreos, antes de que el avión tomara el pique directo a tierra (sin planeo).

6.7 Esquema de investigación

En la figura 14 se muestra cómo el cuadro de hipótesis, fundamentado en la teoría física y de ingeniería, orienta la investigación de campo del accidente.

Fig. 14. **Proceso de investigación. Caso ilustrativo**



Fuente: elaboración propia.

6.8 Investigación de campo y confrontación de hipótesis

Por ser este ejercicio solo un caso ilustrativo de planteamiento de hipótesis y esquema de investigación, se cotejará con el informe de investigación real del siniestro para verificar lo acertado o desacertado de las hipótesis así planteadas.

Al corroborar con los resultados preliminares de las investigaciones oficiales, se encuentra que el piloto había efectuado los procedimientos adecuados y que había reportado la pérdida de control de la aeronave. El morro subía y bajaba, en automático, sin que el piloto pudiera intervenir, tratando teóricamente de corregir el ángulo de ataque hasta entrar en pérdida y quedar sin sustentación. Lo que ubica en la hipótesis 1 del diagrama antes presentado.

En las etapas iniciales de la investigación, se encontró que existía un potencial para un movimiento automático del comando de nariz abajo del estabilizador horizontal cuando el sistema de control de vuelo en un *Boeing 737 MAX*, recibiera una entrada equivocada del sensor AOA (sensor de ángulo de ataque).²¹

En otra de las vías de investigación seleccionadas y efectuadas, en información de antecedentes y casos similares se encontró que, hacía solo 5 meses, otro avión del mismo modelo había sufrido un accidente similar, bajo las mismas circunstancias, con los mismos elementos y con el mismo desenlace fatal.

21 Federal Democratic Republic of Ethiopia, Ministry of Transport, Aircraft Accident Investigation Bureau. *Report No. AI – 01/19: Aircraft Accident Investigation Preliminary Report*. Ethiopian Airlines Group. B737-8 (MAX) Registered ET-AVJ. (2019). https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_preliminar_b737-8max_ethiopia_es.pdf.

Entre otros datos importantes, se encontró que el avión fue diseñado para llevar a 162-178 pasajeros, dependiendo de la configuración de asientos. El modelo 737-8 MAX fue lanzado al mercado el 30 de agosto de 2017, y contaba con el certificado de tipo de la FAA para el 8 de marzo de 2017.

El avión siniestrado había sido construido en 2018 y acumulaba solo 1 330,3 horas en 382 ciclos al momento del accidente.

CONCLUSIONES

1. Los accidentes tecnológicos constituyen una fenomenología de procesos distinta, poco estudiada como tal y, quizá, todavía una ciencia en ciernes en la que la ingeniería está tratando de atar los cabos para diseñar sistemas seguros conforme recibe la demanda de las sociedades actuales.
2. Bajo el enfoque sistémico, las fallas mecánicas constituyen apenas un subgrupo de las fallas tecnológicas.
3. Las fallas coexisten como un sistema inherente a las tecnologías aplicadas en las actividades humanas y están presentes, no solo en las máquinas e instalaciones, sino en cada aspecto de una operación tecnológica.
4. Los accidentes graves o siniestros ocurren por el ataque a una configuración de equilibrio físico en los sistemas de tecnología mecánica, lo que brinda una clave para la ingeniería de prevención.
5. Si bien una tecnología sin fallas no es alcanzable, ha quedado evidenciado que una tendencia a cero en ocurrencia de accidentes sí puede lograrse mediante el estudio y la comprensión de cómo se introducen las fallas al sistema y cómo se determina una ruta crítica con el potencial de alcanzar el núcleo de equilibrio del sistema.

RECOMENDACIONES

1. Promover y demandar análisis de accidentes para lograr efectos más pronto y significativos, en materia de seguridad física en operación de sistemas tecnológicos.
2. Promover procesos de investigación preventiva de siniestros en las áreas y tecnologías con ocurrencia ya registrada de accidentes graves. Esto ayudará a inicializar y formalizar la acumulación de datos y conocimientos valiosos que permitan a la ingeniería diseñar los cambios necesarios en nuestros sistemas operativos de tecnología mecánica.
3. Ante la ocurrencia de sucesos indeseables en los sistemas, la lamentación, sirve de muy poco. La voluntad, la destreza y la práctica de “cambiar las cosas” son verdaderas manifestaciones de aspirar a una mejor condición de seguridad para todas las personas, sus bienes, la infraestructura económica y el ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABREU, Jean Batista, GODOY, Luis Augusto. *Investigación de causas de explosiones en plantas petrolíferas: el accidente de Buncefield*. En: *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 9, 16 p.
2. BIJKER, Wiebe. *La vulnerabilidad de la cultura tecnológica*. *Redes*. Vol. 14, pp. 117-140. ISSN: 0328-3186. 2008. [en línea]. <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90717063005>>. [Consulta: 13 de julio de 2019].
3. ESTANY, Anna. *La convergencia de lo cognitivo y lo social en los errores humanos*. En: *Tópicos: Revista de filosofía* (México), 2008, no 35, ISSN: 0188-6649. 27 p.
4. FIELDING, E., LO, Andrew y YANG, Hellen. *The National Transportation Safety Board: A model for systemic risk management*. En: *Journal Of Investment Management*, Vol. 9, No. 1, (2011), SSRN 1695781. 33 p.
5. GIANONATI GARCÍA, Marina. *Actualización estadística de siniestralidad marítima entre 2011 y 2015*. Trabajo de fin de grado en náutica y transporte marítimo. España: Universidad de La laguna. 2017. 95 p.
6. GODOY, Luis; ESCAUDAR, Claudio; JACA, Rossana; PINTO, Federico. *Revisión crítica de algunas teorías de accidentes*

asociadas a la infraestructura. En: Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 1(2), 43 p.

7. MARTÍ, Carlos Rodrigo. *Régimen jurídico y metodología de investigación de siniestros marítimos*. Proyecto de fin de carrera. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2008, 159 p.
8. NOON, Randall K. *Forensic engineering investigation*. U.S.A.: CRC Press, 2001. 451 p.
9. GARCÍA, Eduardo; GONZÁLEZ, Juan Carlos; LÓPEZ, José; LUJÁN, José Luis; GORDILLO, Mariano; OSORIO, Carlos y CÉLIDA, Valdés. *Ciencia, tecnología y sociedad: una aproximación conceptual. Cuadernos de Iberoamérica*. España: Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2001. 166 p.
10. PETROSKI, Henry. *To engineer is human: The role of failure in successful design*. U.S.A.: St Martins Press, 1985. 12 p.
11. ROJAS, M. *Análisis de falla: un viaje a la raíz del problema y la solución*. En: *Revista Metal Actual*, 2007, vol. 5, 7 p.