



Pontificia Universidad Católica Argentina

Facultad de Química e Ingeniería del Rosario

Estudio de Datos de Fallas Orientado al Análisis Cuantitativo de Riesgos

Trabajo Final
Ingeniería Ambiental

Autor:
Juan Enrique Balestra

Tutora:
Ing. Soledad Madariaga



Indice

1 - Introducción	3
1.1 - Descripción de la Problemática	3
1.2 - Fundamentos Históricos	5
1.3 - Antecedentes	7
1.3.1 - Accidente de Flixborough.....	7
1.3.2 - Accidente de Seveso	8
1.3.3 – Accidente de Bhopal	10
1.3.4 – Accidente nuclear de Chernóbyl.....	11
1.3.5 – Derrame del Exxon Valdez.....	13
1.3.6 – Accidente de Piper Alpha	14
1.3.7 – Derrame de Deepwater Horizon (British Petroleum).....	16
1.3.8 – Accidente nuclear de Fukushima.....	18
1.4 - Objetivos Generales	21
1.5 - Objetivos Específicos	21
2 - Marco Legal	22
3 - Términos y Definiciones.....	23
3.1 – Riesgo	23
3.2 - Falla	26
3.2.1 - Diferencia entre Peligro y Riesgo.....	28
3.3 – Interrelación de términos	29
3.4 – Curva de la Bañera.....	29
4 – Calculo Estadístico e Interpretación	31
4.1 – Predicciones para Tasa de Falla Constante.....	31
4.2 – Niveles de Confianza con doble límite	34
5 – Bases de Datos de Fallas	37
5.1 – Introducción a las Bases de Datos.....	37
5.2 – Fuentes de Datos y Rangos	38
5.3 – Limites de las predicciones.....	40



5.4 – Manuales de Bases de Datos	42
5.4.1 – Manejo de Información en Manual de Datos	42
5.4.2 – Tablas de Datos	44
5.4.3 – Tablas detalles	46
6 – Sistemas Propios de Toma de Datos	49
6.1 – Norma Internacional ISO 14.224.....	49
6.1.1 – Estructura de Jerarquías	50
6.1.2 – Limites de Equipos.....	50
6.1.3 – Estructura de la Información.....	51
6.1.4 – Estandarización de Averías y Mantenimiento	60
6.1.5 – Requerimientos de Datos para Análisis Cuantitativo de Riesgos.....	68
6.2 - Recolección de Datos.....	70
6.2.1 - Importancia de la recolección de datos	70
6.2.2 – Dificultades	70
6.2.3 - Horas de trabajo	71
6.2.4 – Planillas y Bases de datos.....	73
6.2.5 – Recomendaciones.....	75
6.2.6 – Análisis de la información recolectada.....	76
7 – Conclusiones	79
Anexo I – Distribución de Pearson	80
Bibliografía.....	83



1 - Introducción

1.1 - Descripción de la Problemática

Desde hace varias décadas se ha identificado la necesidad de crear herramientas para reconocer fuentes de peligrosidad y medir su magnitud, estimando sus consecuencias potenciales, para así decidir cursos de acción, sean preventivos o correctivos. Las herramientas que analizan las causas y evalúan las posibles consecuencias negativas por la presencia de agentes peligrosos (probabilidad de ocurrencia, extensión y magnitud de los efectos, etc.) son los estudios de riesgo.

La evaluación de riesgos es una herramienta que puede usarse para estimar y jerarquizar la importancia ambiental de una medida, calculando cuantitativamente los impactos por los daños a la salud o a los ecosistemas derivados de la exposición a situaciones de contingencia. La información que una evaluación de riesgos proporciona puede ser utilizada para apoyar decisiones de control ambiental, ayudando a las agencias normativas a tomar decisiones racionales sustentadas en la mejor información científica disponible. (Smith, 2001)

En los últimos años la evaluación del riesgo ambiental se ha convertido en un instrumento imprescindible para la toma de decisiones ambientales justificadas. Este tipo de estudios intenta dar respuesta técnica a interrogantes del tipo *cuál* es el peligro; a quiénes y *cómo* podría afectar y *cuáles* serían las acciones más apropiadas para controlar los riesgos ambientales en cada sitio y/o instalación en particular. Para esto, es una herramienta fundamental el análisis estadístico, basado en predicciones y datos existentes, a fin de definir probabilidad de ocurrencia, extensión y magnitud de los efectos, etc. El *Sistema de Obtención de Datos* es la herramienta fundamental para asegurar la fiabilidad de los análisis posteriores. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003)

Durante el desarrollo del presente trabajo, se hará foco en el primer paso de los *Sistemas de Determinación Cuantitativa de Riesgos*, que es la obtención de *Datos de Calidad*. Se identificarán las fuentes de datos, los medios para obtenerlos, almacenarlos e interpretarlos. Para ello se ha recurrido a las herramientas existentes en el mundo del *Mantenimiento*



Preventivo, principalmente los conceptos y técnicas de análisis desarrolladas en el *Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM)*.

A partir del análisis, se han identificado tres fuentes de datos de fallas, de las cuales se obtiene información confiable y certera, que permite realizar análisis cuantitativos sólidos de las probabilidades de fallas que puedan derivar en catástrofes ambientales. Estas fuentes son:

1. Información brindada por el fabricante del equipo en estudio.

Se desarrollarán herramientas de muestreo y análisis estadístico a fin de determinar la tasa de falla basado en testeos de una población. Esta información suele ser brindada por el fabricante, como muestra de fiabilidad de su producto.

2. Manuales de Datos.

Se describirá la estructura general de las bases de datos de fallas que se pueden encontrar en el mundo de la ingeniería, haciendo principal hincapié en el Manual de Datos OREDA, principal fuente de información de fallas. Dicho Manual se ha desarrollado para las instalaciones Off Shore de la Industria Petrolífera y Gasífera, pero puede adaptarse a la Industria en general.

3. Datos propios basados en Sistemas de Toma de Datos.

Se describirán las herramientas disponibles para la confección de sistemas de toma de datos en la propia organización, siendo la Norma ISO 14224 una herramienta fundamental para implementar sistemas estandarizados que permitan el posterior intercambio de información con instalaciones similares, a fin de enriquecer el análisis.



1.2 - Fundamentos Históricos

A lo largo de la historia de la ingeniería, la mejora de la confiabilidad que surge como consecuencia natural del análisis de fallas ha sido una característica central del desarrollo industrial y tecnológico. Este principio de "prueba y corrección" se había practicado mucho antes del desarrollo de procedimientos formales para la recopilación y el análisis de datos porque la falla generalmente es evidente y, por lo tanto, conduce inevitablemente a modificaciones de diseño.

El diseño de sistemas relacionados con la seguridad de las personas y el medio ambiente ha evolucionado en parte en respuesta a la aparición de nuevas tecnologías, pero en gran medida como resultado de las lecciones aprendidas de fallos que en muchos casos han desatado catástrofes conocidas mundialmente. La implementación de tecnología en áreas peligrosas requiere la aplicación formal de este principio de retroalimentación para maximizar la tasa de mejora de la confiabilidad, algo que no ha sucedido siempre, sino que se acentúa a mediados de la primera mitad del siglo pasado.

Los diseños del siglo XIX y principios del siglo XX estuvieron menos severamente limitados por las presiones de costos y horarios de hoy. Por lo tanto, en muchos casos, se lograron altos niveles de confiabilidad como resultado del diseño excesivo. Por consiguiente, no se identificó la necesidad de técnicas cuantificadas de evaluación de la confiabilidad durante el diseño y el desarrollo y, en consecuencia, había pocos incentivos para la recopilación formal de datos de fallas.

Otro factor es que, hasta bien entrado el siglo XX, los componentes se fabricaban individualmente. La producción en masa y la estandarización de componentes no se aplicaron y, en este marco, el concepto de una tasa válida de falla de componentes repetibles no podía existir. La fiabilidad de cada producto era, entonces, dependiente casi exclusivamente del fabricante y menos determinada por la "combinación" de confiabilidad de las piezas. Sin embargo, la producción en masa de piezas mecánicas estándar ha sido el caso desde principios del siglo pasado.

La llegada de la era electrónica, acelerada por la Segunda Guerra Mundial, llevó a la necesidad de componentes más complejos producidos en masa con un mayor grado de variabilidad en los parámetros y dimensiones involucrados. La experiencia de poca confiabilidad en el campo del



equipo militar durante las décadas de 1940 y 1950 centró la atención en la necesidad de métodos más formales de *Ingeniería de Confiabilidad*. Como se ha dado a lo largo de la historia, una vez más, la industria bélica fue fundamental en el desarrollo de nuevas tecnologías y el desarrollo industrial.

Esto dio lugar a la recopilación de información sobre fallas, y su posterior interpretación, tanto del campo como de pruebas. Los bancos de datos de fallas se crearon a mediados de la década de 1960 como resultado del trabajo en organizaciones como UKAEA (Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido) y RRE (Royal Radar Establishment, Reino Unido) y RADC (Corporación de Desarrollo del Aire de Roma, EE. UU.). La manipulación de los datos fue manual e implicó el cálculo de las tasas a partir de los datos del incidente, los inventarios de los tipos de componentes y los registros de las horas transcurridas. Esta actividad fue estimulada por la aparición de técnicas de modelado de predicción de confiabilidad que requieren tasas de falla de componentes como entradas para las ecuaciones de predicción.

La disponibilidad y el bajo costo de los softwares han permitido el listado y la manipulación de datos de incidentes con un menor gasto de horas de trabajo. La clasificación automática rápida de los datos fomenta el análisis de fallas. Este no es un factor menor para contribuir a una evaluación de confiabilidad más efectiva, ya que las tasas de falla genéricas permiten solo las predicciones de confiabilidad del conjunto de piezas o sistema. Para abordar fallas específicas del sistema, es necesario registrar los modos de falla del componente afectado.

La característica de la recolección de datos que requiere mucha mano de obra es el requisito para el registro de campo, que sigue siendo un obstáculo importante para la información completa y precisa. “La motivación del personal para proporcionar informes de campo con suficiente detalle relevante es un problema de gestión actual. Con el rápido crecimiento de las funciones integradas de prueba y diagnóstico en los equipos, una tendencia futura puede ser la aparición de algunos informes automáticos de fallas limitadas”. (Smith, 2001)



1.3 - Antecedentes

Se han sucedido un número importante de eventos que han dado inicio al desarrollo de metodologías de análisis de fallas para determinar los riesgos ambientales asociados a las operaciones industriales y antrópicas en general. Se repasan algunos antecedentes históricos fundamentales que impulsaron el campo de estudio.

1.3.1 - Accidente de Flixborough

Junio 1974 - El accidente de Flixborough, ocurrió en la sección de reacción en la planta de producción de caprolactama (monómero usado en la fabricación de polímeros como el nylon) a partir de la oxidación de ciclohexano que la empresa Nypro tenía en la localidad de Flixborough (Reino Unido). El proceso de producción consistía en un tren de seis reactores en serie en los que el ciclohexano se oxida a ciclohexanona y ciclohexanol por inyección de aire en presencia de un catalizador.

La reacción es fuertemente exotérmica y se realizaba a $8,8 \text{ kg/cm}^2$ de presión en los reactores y a una temperatura de $155 \text{ }^\circ\text{C}$. Por tanto, existía una atmósfera explosiva dentro de los reactores, que se controlaba mediante la inyección de nitrógeno y la evaporación de parte del ciclohexano de cada reactor.

Algunos días antes de que ocurriera el accidente, se produjo una fuga en el reactor número 5 y una grieta de casi 2 metros, lo que indujo a eliminar dicho reactor en serie y se sustituyó por un conducto o tubería "by-pass" que unía los reactores 4 y 6. Dicha tubería de unión tenía un diseño claramente diferente al resto de uniones entre los diferentes reactores.

El accidente se produjo precisamente por la rotura de esta unión provisoria entre los reactores 4 y 6 debido a un aumento de la presión en los mismos (alcanzó aproximadamente $9,2 \text{ kg/cm}^2$). El control de presión se podría haber realizado venteando parte del gas de los reactores a las antorchas inyectando nitrógeno, pero había poca cantidad almacenada y no se podía recibir más nitrógeno hasta la media noche, lo que habría motivado la paralización de la producción. Por tanto, se decidió no ventear, lo que evitó el control de la presión en los reactores.

Por la tarde, se produjo un escape de unas 40 Tn de ciclohexano que formó una nube inflamable y casi inmediatamente explotó generando una explosión de vapor no confinada.



Ilustración 1-1 Imágenes del accidente de Flixborough

Las consecuencias fueron:

- ≡ Destrucción completa de la planta de producción de caprolactama
- ≡ 28 personas muertas, 36 heridos graves y varios centenares de heridos leves
- ≡ Daños graves en 1988 casas y negocios cercanos
- ≡ Extensión de los daños a otras instalaciones próximas

1.3.2 - Accidente de Seveso

Julio 1976 - La planta de Icmesa S.P.A., situada en la localidad de Seveso (17.000 habitantes Lombardia, Italia), se dedicaba a la fabricación de pesticidas y plaguicidas a partir de una reacción tipo "batch" con 2,4,5-triclorofenol (TCP). El TCP se fabricaba a partir de 1,2,4,5-tetraclorobenceno por reacción con soda cáustica en presencia de etilenglicol y xileno y a unos 160-200 °C. La reacción es fuertemente exotérmica a presión atmosférica y el calor generado se retiraba evaporando el disolvente que retornaba al reactor. Terminada la reacción, se añadía ácido clorhídrico para fabricar el TCP. El reactor estaba protegido por un disco de ruptura a presión de 3,6 bares con venteo directo a la atmósfera.

En la reacción se produce como subproducto una sustancia denominada 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina, más conocida como TCDD. De todos los compuestos de la familia de las dioxinas, el TCDD es el más tóxico. Mientras que a unos 180 °C apenas se forman unos pocos ppm de TCDD, cuando la temperatura alcanza unos 250 °C, se pueden generar grandes cantidades. Las cantidades generadas son prácticamente cero por debajo de 150 °C, menos de 1 ppm a 180 °C y 1.600 ppm en 2 horas entre 230-260 °C.

La tarde anterior al accidente, el reactor se cargó con 2.000 kg de triclorobenceno (TCB), 1.050 kg de hidróxido de sodio, 3.300 kg de etilenglicol y 600 kg de xileno. La reacción no terminó esa tarde, dejando el final para la mañana siguiente, cerrando el vapor y parando la agitación en el reactor. A la mañana siguiente, se produjo una reacción exotérmica incontrolada del tipo runaway, lo que generó un aumento de presión en el reactor y la apertura del disco de ruptura. El resultado fue la emisión de una nube tóxica que contenía TCDD en una concentración aproximada de 3.500 ppm. El área cubierta por la nube fue de aproximadamente 1.800 hectáreas y produjo numerosos daños a las personas (730 en el área).

Las lesiones fueron principalmente dérmicas, así como daños al medio ambiente (flora y fauna). Se produjeron daños también en la agricultura, ganadería, suelos contaminados, construcción, comercios, etc. En total, cerca de 300 millones de dólares ha tenido que abonar Roche en concepto de compensaciones al Estado Italiano por el accidente. (Ecologistas en Acción, 2016)



Ilustración 1-2 Imágenes de las consecuencias del accidente de Seveso



1.3.3 – Accidente de Bhopal

Diciembre 1984 – El día 3 de diciembre de 1984, en la empresa de plaguicidas que la firma Union Carbide poseía en la región de Bhopal, en el centro de India, se estaban realizando tareas de mantenimiento y limpieza con agua a presión en el interior de unas canalizaciones de trasiego de isocianato de metilo (MIC).

El agua inyectada en las tuberías de MIC circulaba con fuerza arrastrando impurezas adosadas a las paredes del tubo, así como cristales de cloruro de sodio y restos metálicos. Los operarios de limpieza no tuvieron la precaución de cerrar el conducto con el empleo de unos discos especiales y el agua junto con los desechos arrancados se filtraron al interior de la cisterna E-610, que contenía 42 toneladas de MIC. Conectadas a ella había otras dos cisternas de MIC, la E-611 y la E-619, que contenían otras 21 toneladas de la misma sustancia. El agua, los cristales de cloruro de sodio y los restos metálicos en contacto con el MIC provocaron una violenta reacción exotérmica del líquido, que pasa rápidamente al estado gaseoso con desprendimiento de calor. En cuestión de segundos, la presión en el interior de la cisterna pasa de 0,4 a 10,8 kg/cm², estallando las válvulas de seguridad por la sobrepresión. A partir de entonces la fuga tóxica fue inevitable.

Dos altas columnas de gas, a modo de géiser, se proyectaron hacia el cielo de Bhopal. Los bomberos de la fábrica fueron incapaces de abatir la nube con agua pulverizada, ya que el chorro de las mangueras no cobró suficiente altura, y los sistemas de seguridad de la fábrica se encontraban apagados o inutilizados. Sin posibilidad de hacer nada, la nube tóxica se fue haciendo cada vez mayor y un ligero viento del norte la impulsó en dirección contraria, hacia el sur, hacia la ciudad.

Debido al aumento de temperatura y la violenta reacción del MIC, éste comenzó a descomponerse en varios gases muy tóxicos: fosgeno, monometilamina y ácido cianhídrico (cianuro). Todos ellos tienen una densidad superior a la del aire, por lo que se mantienen prácticamente a nivel del suelo. Según algunos medios de comunicación, la nube sobrevoló unos 40 kms² de la ciudad.

Sólo en la primera semana murieron entre 6.000 y 8.000 personas. Una cuarta parte de la población expuesta a los gases venenosos se ha convertido hoy en enfermos crónicos, de los cuales 50.000 han quedado con incapacidad laboral absoluta para el desempeño de cualquier

tipo de trabajo. Se estima que llega a 500.000 el total de afectados por la catástrofe. Según un estudio realizado por Greenpeace, en 1999 seguían contaminadas las aguas de los pozos y la tierra por metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes (COPs). La presencia de sustancias tóxicas era 682 veces mayor que la dosis máxima aceptable hacia finales de 1999. (Red Proteger, 2012)



Ilustración 1-3 Bhopal es considerado hasta el día de hoy el accidente industrial más importante de la historia

1.3.4 – Accidente nuclear de Chernóbyl

Abril 1986 – Tal vez el accidente más famoso de la historia se dio en la central nuclear Vladímir Ilich Lenin, en el norte de Ucrania (en aquel entonces parte de la URSS).

El 25 de abril de 1986, se programó un mantenimiento de rutina del cuarto reactor RBMK¹, y se planeó usar el tiempo de inactividad para probar si el reactor podía enfriarse si la central perdía el suministro eléctrico. El responsable del experimento era una persona muy experimentada, un ingeniero nuclear de los mejores que tenía la Unión Soviética, de un carácter muy fuerte (Miranda, 2019). Durante esta prueba, los trabajadores infringieron protocolos de seguridad y aumentó la potencia dentro de la central. A pesar de los intentos de apagar el

¹ Los reactores RBMK se diseñaron para permitir el cambio de las barras de combustibles sin apagar el reactor. Esto requiere grandes grúas encima del núcleo, y, como resultado, el reactor RBMK es muy alto (alrededor de 70m), lo que supone una dificultad de construcción de una estructura de contención, por lo que las conducciones en la cúspide del reactor no disponen de una estructura de contención de emergencia. En el accidente de Chernóbyl, cuando la presión de vapor subió lo suficiente, la cubierta reventó, rompiendo todas estas conducciones superiores.



reactor por completo, otro aumento de potencia causó una reacción en cadena de explosiones de vapor en su interior, volando la cubierta. Finalmente, el núcleo del reactor se expuso y arrojó material radioactivo hacia la atmósfera.

Los bomberos intentaron apagar una serie de llamaradas en la central, y eventualmente, los helicópteros arrojaron arena y otros materiales en un intento de sofocar el incendio y contener la contaminación. A pesar de la muerte de dos personas en las explosiones, la hospitalización de trabajadores y bomberos, y el peligro de lluvia nuclear y fuego, no hubo evacuados en las zonas circundantes (ni siquiera en la ciudad de Prípiat a solo 3 km del accidente) hasta 36 horas después del comienzo del desastre. (Blakemore, 2019)

El accidente de Chernóbil fue una combinación de un mal diseño de la central nuclear, que además no disponía de un recinto de contención, junto con los errores producidos por los operadores de esta, dejando fuera de servicio voluntariamente varios sistemas de seguridad con el fin de realizar un experimento, en el marco de un sistema en el que el entrenamiento era escaso, y en el que no existía un organismo regulador independiente.

La Unión Soviética no tenía un sistema independiente de inspección y evaluación de la seguridad de las instalaciones nucleares, es decir, un organismo regulador, como en los países occidentales.

El diseño de un reactor del tipo RBMK no hubiera sido nunca autorizado en los países occidentales. De hecho, nunca se ha construido un reactor de este diseño fuera de la antigua Unión Soviética. (Foro de la Industria Nuclear Española, 2018)

Consecuencias - En principio, hubo 28 muertos tras el accidente, mientras que más de 100 personas resultaron heridas. El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas informó que más de 6.000 niños y adolescentes desarrollaron cáncer de tiroides tras la exposición a la radiación por el incidente.

Los investigadores internacionales creen que, en última instancia, aproximadamente 4.000 personas que fueron expuestas a altos niveles de radiación podrían sufrir diferentes tipos de cáncer; mientras que aproximadamente 5.000 personas que fueron expuestas a niveles más bajos de radiación podrían correr la misma suerte. Sin embargo, las consecuencias totales del accidente, que incluyen los efectos en la salud mental e incluso en las generaciones siguientes, siguen siendo investigados. (Blakemore, 2019)



Ilustración 1-4 Vista del reactor n°4 destruido

1.3.5 – Derrame del Exxon Valdez

Marzo 1989 - A las cuatro y media de la noche, el 24 de marzo de 1989, el petrolero Exxon Valdez, cargado con 1,264,155 barriles de petróleo crudo, encalló en Blich Reef, en la parte noreste del Príncipe William Sound, Península de Alaska. Alrededor de una quinta parte de la carga total, casi 41 millones de litros de petróleo, se derramó en el mar. Después de tres días de clima tranquilo y mares suaves, surgieron fuertes vientos del noreste y dispersaron el petróleo más allá de cualquier posibilidad de contención. Gran parte del petróleo se convirtió, mediante la mezcla con el agua de mar impulsada por el viento, en una emulsión conocida como *mousse* que no se quema y que es muy difícil de eliminar de la superficie del mar o de la costa. El aceite derramado, en forma de brillos finos y espuma espesa, continuó extendiéndose hacia el suroeste.

Equipos de estudio del accidente estimaron que el 35% del petróleo derramado se evaporó, el 40% se depositó en las playas dentro del Prince William Sound y el 25% ingresó al Golfo de Alaska, donde quedó varado o se perdió en el mar.

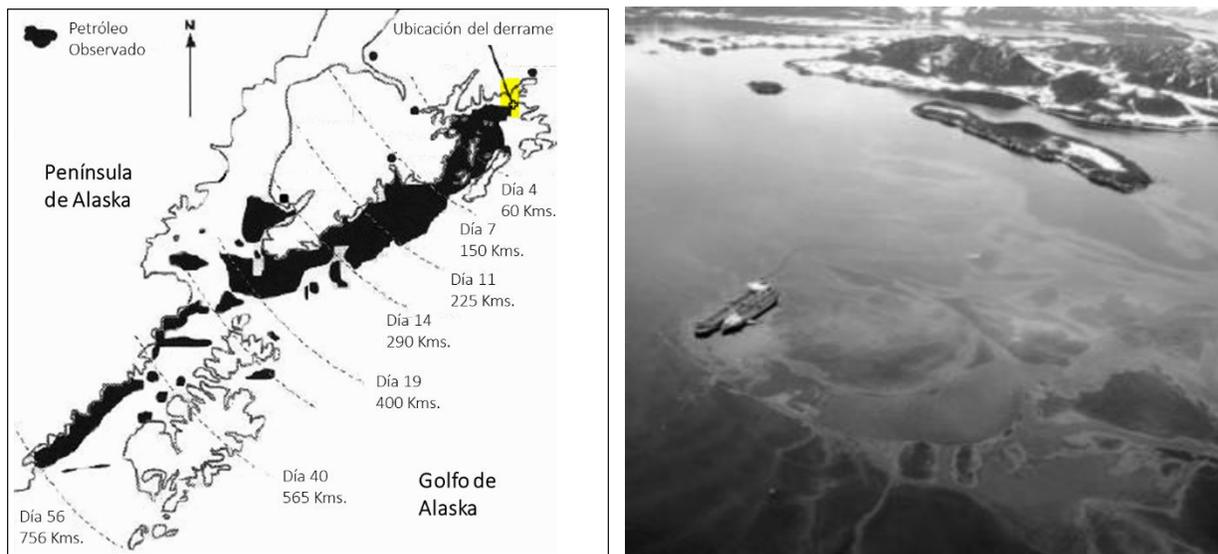


Ilustración 1-5 Alcances del derrame Exxon Valdez en el Golfo de Alaska

La causa probable del derrame fue la falla del Práctico² en maniobrar adecuadamente el buque debido al cansancio y el trabajo excesivo. Otros factores contribuyentes fueron, la inadecuada vigilancia de navegación del Capitán, la incapacidad de Exxon Shipping Company de proporcionar suficiente tripulación para el Exxon Valdez, y la falta de un servicio efectivo de tráfico debido a equipos y niveles de personal inadecuados. Una combinación de errores humanos y de tecnología e infraestructura que llevaron a un desastre ecológico en uno de los ecosistemas más delicados del planeta. (Way Back Machine, 2013)

1.3.6 – Accidente de Piper Alpha

Julio 1988 – La plataforma petrolífera de la empresa Occidental Petroleum Corporation, denominada Piper Alpha, había entrado en funcionamiento en 1976, en el Mar del Norte, a unos 190 km de Aberdeen, en la costa de Escocia, con una capacidad de producción de 250.00 barriles de petróleo al día. Inicialmente tenía un diseño de seguridad, donde las operaciones más peligrosas se encontraban separadas entre sí y del personal por módulos y muros cortafuegos. En 1980 se le realizaron modificaciones con la instalación de equipamiento para

² Tripulante que dirige el barco en momento de maniobras, conocedor del lugar.



la recuperación de gas. De esta manera, las condiciones de seguridad iniciales no se mantuvieron y operaciones sensibles se desarrollaban en un mismo módulo. De esta manera, la zona de compresión de gas y la sala de control quedaron en un mismo lugar. Sumado a esto, la falta de mantenimiento general en los últimos años anteriores al accidente propició las condiciones para la tragedia.

El día 6 de julio se estaban realizando tareas de mantenimiento en una bomba de back up (Bomba B) en la cubierta de producción. El responsable de las tareas decide retirar una válvula para limpieza. El turno estaba llegando a su fin, y por falta de tiempo, el operario decide colocar una plancha de acero en lugar de la válvula. El supervisor firma el parte de trabajo en lugar del gerente de producción, que en esos momentos está ocupado, y lo deja sobre la mesa del supervisor de proceso a las 18:00, en la sala de control.

Durante la noche, la bomba principal falla. Para suplir ese fallo, se decide activar la bomba B, desconociendo que la válvula ha sido retirada y sustituida por una plancha de acero, lo que lleva a una sobrepresión y posteriormente una explosión. Entre las 22 y las 00.45 hs la plataforma sufre una serie de explosiones sucesivas y finaliza colapsando y cayendo casi en su totalidad al mar. Las luces de emergencia funcionan solo 15' y la oscuridad y el humo negro imposibilitan el rescate aéreo. Una embarcación de rescate sufre el impacto de una explosión y su tripulación no sobrevive al episodio.

Como consecuencia del accidente fallecieron 165 personas, además de los daños ambientales causados por la fuga de crudo al mar. Se estableció una comisión de investigación para aclarar los motivos del accidente y realizar recomendaciones para el futuro. Se presentó un informe con 106 recomendaciones de seguridad, las cuales fueron adoptadas por la industria en su totalidad. (BBC News, 2005)



Ilustración 1-6 Plataforma Petrolífera Piper Alpha antes y después del accidente

1.3.7 – Derrame de Deepwater Horizon (British Petroleum)

Abril 2010 - El 20 de abril, la plataforma de perforación petrolera Deepwater Horizon, que operaba en Macondo Prospect en el Golfo de México, explotó y se hundió, lo que dejó como resultado 11 trabajadores muertos y el mayor derrame de petróleo en la historia. Casi 5 millones de barriles de petróleo fluyeron durante 87 días, hasta que se cerrara el 15 de julio.

El pozo de petróleo sobre el que se colocó la plataforma DH se encuentra a unos 1.522m de profundidad y su perforación se extendió aproximadamente 5.486m hacia la roca madre. En la noche del 20 de abril, una oleada de gas natural atravesó un núcleo de hormigón instalado en el fondo marino para sellar el pozo para su uso posterior. (EPA - Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2017)

Una vez liberado por la fractura del núcleo, el gas natural viajó por el conducto elevador hasta la plataforma, donde se encendió, matando a 11 trabajadores e hiriendo a otros 17. La plataforma se volcó y se hundió en la mañana del 22 de abril, rompiendo el elevador, por donde lodo de perforación se había inyectado para contrarrestar la presión ascendente del petróleo y el gas natural. Sin ninguna fuerza opuesta, el petróleo comenzó a descargar en el golfo.

El primer intento para cerrar la fuga fue mediante un sistema de ariete de corte ciego, consistente en una serie de cuchillas que cortan el paso a través de las cañerías de elevación.



A causa de la sobrepresión, el ducto se había deformado, por lo que las cuchillas no cerraban el paso en su totalidad y el petróleo y gas natural siguieron escapando. Sucesivos esfuerzos para frenar el derrame permitieron cerrar parcialmente las fugas, disminuyendo el caudal de petróleo y gas que se perdía en el mar con una estructura tipo domo, llamada LMRP³. (Pallardy, 2020)

A principios de julio, se retiró la tapa LMRP durante varios días para poder instalar un sello más efectivo y permanente. Este sistema de contención despejó el camino para un "fondo de muerte", considerado como el medio más probable de sellar permanentemente la fuga. Esto implicó bombear cemento a través de un canal paralelo y finalmente se cruzó con el pozo original. La construcción de dos de estos pozos comenzó en mayo. El 17 de septiembre, la maniobra de muerte en el fondo se ejecutó con éxito a través del primer pozo de alivio.

Reportes presentados al entonces presidente de los Estados Unidos por la Comisión Nacional para el Estudio del Derrame y Hundimiento de la Plataforma Deepwater Horizon determinaron que la causa principal del accidente fue el hormigonado utilizado en el fondo del mar. Se utilizaron catalizadores para aumentar la velocidad de fraguado, que terminaron disminuyendo la resistencia de la estructura a la presión interna del gas natural y petróleo confinados. Esto llevó a la liberación de Gas que terminó con la explosión inicial. (National Commission on the BP Deepwater Horizon, 2011)

³ Lower Marine Riser Package.

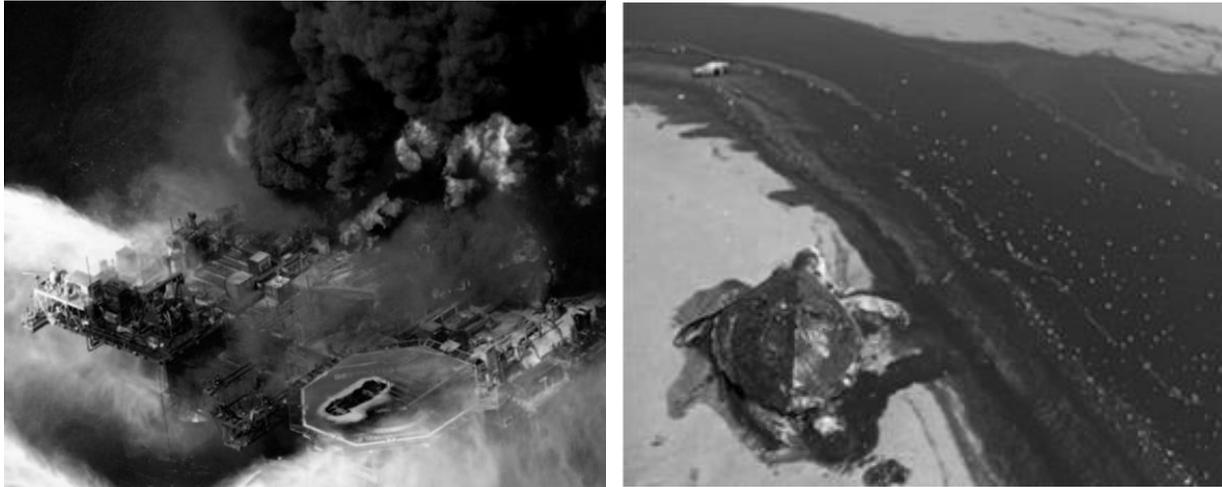


Ilustración 1-7 Imágenes de las consecuencias del accidente de DWH

1.3.8 – Accidente nuclear de Fukushima

Marzo 2011 - Se trata del accidente nuclear más grave de la historia después del accidente de Chernóbyl.

El día 11 de marzo del 2011 se produjo un terremoto de 8,9 grados en la escala de Richter cerca de la costa norte oriental de Japón a las 14:46, alcanzando el nivel más alto de la historia de Japón y siendo el quinto terremoto más fuerte de todo el planeta desde que se tienen registros. Como consecuencia, se produjo un fuerte tsunami. Pocas horas después del terremoto llegaban las primeras olas de 10 metros a las costas de Fukushima.

Inmediatamente se activaron los sistemas de seguridad de las centrales nucleares de la zona. En la Central nuclear de Fukushima Daiichi se pararon automáticamente los reactores 1, 2 y 3. Las unidades 4, 5 y 6 estaban paradas por mantenimiento periódico.

La refrigeración de la planta requería energía de la red eléctrica, que se cortó por el terremoto. Como back up disponía de generadores eléctricos. Sin embargo, los motores diésel se estropearon debido a la inundación tras el tsunami. Por ello, se evacuaron a los residentes dentro de un radio de 3km de la central (unas 2.000 personas).



Dos días después, el 13 de marzo, el reactor número 3 sufrió una explosión. Se comenzó a inyectar agua de mar con ácido bórico⁴ al reactor para enfriarlo. Para disminuir la presión en su interior se realizan maniobras de venteo.

El 15 de marzo se registró una nueva explosión, esta vez en el reactor número 4, provocando un incendio en su interior. Se evacuaron las 50 personas que trabajaban en el lugar por la alta radiación. Debido a la dificultad de utilizar el agua de mar para enfriar el reactor intentaron hacerlo con un helicóptero hidrante. Este método tampoco resultó por la elevada radiación en la zona.

Al día siguiente las condiciones de radioactividad mejoraron y los helicópteros ya pudieron sobrevolar la zona para descargar agua de mar sobre los reactores para su enfriamiento. Las condiciones se controlaron. Se instaló un cable de energía eléctrica de 1km para suministrar la energía necesaria para el funcionamiento de los sistemas de refrigeración.

Las autoridades de Japón elevaron la severidad del accidente nuclear de Fukushima del nivel 5 al nivel 7. El más alto de la Escala INES⁵. El mismo con el que se clasificó el accidente nuclear de Chernóbyl. El motivo para clasificar el accidente nuclear al nivel 7 fue la emisión de radioactividad al exterior.

Aunque el accidente de Chernóbyl y el de Fukushima tenga el máximo nivel de gravedad, en este último, el material radiactivo liberado se estimó que era aproximadamente el 10% del liberado en 1986. (Planas, 2011)

⁴ El agua de refrigeración del combustible agotado del reactor número 3 presentaba un nivel elevado de pH (11,2). La acides podía corroer las barras de aluminio que sostenían las varillas de combustible usado, pudiendo desprenderse y aumentara el riesgo de una reacción crítica. Con el ácido bórico (pH 5,1) se buscó neutralizar el pH de la pileta y evitar la corrosión del aluminio.

⁵ Escala Internacional de Accidentes Nucleares



Ilustración 1-8 Enfriamiento de los reactores de Fukushima con agua de mar



1.4 - Objetivos Generales

Los objetivos generales del presente trabajo son:

- ≡ Introducirnos en los sistemas de almacenamiento, organización y utilización de datos recopilados.
- ≡ Analizar las herramientas disponibles en el área de la Confiabilidad para desarrollar metodologías cuantitativas en el análisis de fallas;
- ≡ Identificar la importancia de la estandarización en la recolección de datos de fallas, para lograr información de calidad y estadísticas fiables.

1.5 - Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- ≡ Definir conceptos estadísticos como herramientas para el análisis;
- ≡ Describir los métodos principales de obtención de datos de fallas, que son:
 - Las tasas de fallas provistas por el fabricante.
 - Los Manuales de Datos confeccionados por organismos estatales, internacionales y de cooperación.
 - Sistemas propios de recolección de datos.
- ≡ Describir metodologías apropiadas para el almacenamiento estandarizado de fallas y bases de datos.
- ≡ Explorar los Sistemas de Gestión de Datos basados en la Norma ISO 14224 y Manual Off-Shore Reliability Data (OREDA).
- ≡ Definir herramientas prácticas para la recolección de datos en campo e identificar los principales inconvenientes que se pueden presentar.



2 - Marco Legal

Norma	Ámbito	Descripción
Constitución Nacional	Nación	Art. N° 41: Establece que todos los habitantes del territorio nacional tienen el derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y tienen el deber de preservarlo. A su vez, establece que el Estado tiene la obligación de proteger ese derecho.
Ley N° 25.675/02 Ley General del Ambiente	Nación	Establece presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable.
Ley N° 11.717/99 Ley de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable	Provincia de Santa Fe	Establece principios rectores para preservar, conservar, mejorar y recuperar el medio ambiente, los recursos naturales y la calidad de vida de la población.
Decreto N° 101/03	Provincia de Santa Fe	Reglamenta los artículos 18, 19, 20 y 21 de la Ley N°11.717 Establece metodología de presentación y evaluación del Impacto Ambiental de la actividad industrial. Define herramientas del Plan de Gestión Ambiental.
Resolución N° 306/14	Provincia de Santa Fe	Tiene como objeto prevenir la ocurrencia de accidentes graves derivados de causas tecnológicas o humanas asociadas a ellas que pudieren resultar en determinadas actividades industriales o de servicios, así como la limitación de sus consecuencias tanto para las personas como para el medio ambiente, en el caso de ocurrir.



3 - Términos y Definiciones

3.1 – Riesgo

La definición de *RIESGO* en el contexto de análisis del presente trabajo combina dos factores importantes:

- ≡ Cuanto daño puede causar un evento peligroso y a que, quien o quienes: Consecuencia
- ≡ Cada cuanto tiempo podemos esperar que ese evento ocurra: Frecuencia

De esta manera, podemos definir:

$$\text{Riesgo} = \text{Consecuencias} \times \text{Frecuencia} \quad (\text{Hyatt, 2004})$$

El segundo término de esta ecuación, *Frecuencia*, es lo que se busca determinar a partir de la toma de datos, almacenamiento y análisis. Es aquí donde radica la importancia de desarrollar sistemas de toma de datos, que permitan predecir de manera confiable la frecuencia de ocurrencia de un evento o falla. La determinación de las *Consecuencias* es el otro factor fundamental en el análisis del riesgo, pero no entra dentro del alcance de este trabajo.

La *Gestión del Riesgo* tiene como objetivo reducir los peligros a niveles aceptables para los empleados, el público en general y el ambiente. Pero antes de gestionarlos, es necesario identificarlos y entenderlos. Para ello es fundamental el *Análisis de Riesgo*, una evaluación cuantitativa de las consecuencias y probabilidades de ocurrencia de un evento.

Habiendo realizado la evaluación, el paso siguiente es analizar la *Aceptación del Riesgo*. A diferencia del *Análisis de Riesgo*, para el cual se utilizan herramientas de ingeniería y estadística, la *Aceptación* es un área más bien subjetiva, que busca identificar y establecer el nivel de riesgo admisible. Esto dependerá de los receptores, que pueden ser empleados, vecinos, infraestructura, ambiente y hasta las finanzas mismas de una compañía.

La *Gestión del Riesgo* implica la toma de decisiones. Si el *Análisis del Riesgo* da como resultado niveles aceptables del riesgo para el receptor, no es necesario implementar una reducción del riesgo. Igualmente, en este caso, es conveniente implementar un monitoreo para asegurarse



que la situación no se deteriore en el tiempo y el riesgo se vuelva inaceptable. Este seguimiento debe ser dinámico y continuado. Ahora bien, si al analizar el riesgo, se obtiene que este es inadmisibles, se deben tomar medidas para reducirlo. Las diferentes opciones para la reducción del riesgo deben ser evaluadas y la más eficiente, implementada. Esta etapa del proceso se llama *Control del Riesgo*. El riesgo nunca puede ser eliminado, ya que es intrínseco a la actividad antrópica, pero en la mayoría de los casos puede ser reducido a niveles aceptables. (Hyatt, 2004)

Resumiendo lo dicho hasta ahora, la *Gestión del Riesgo* implica los siguientes pasos:

1. Identificar los peligros potenciales y posibles medidas de control.
2. Estimar consecuencias.
3. Estimar la frecuencia con la que suceden las consecuencias determinadas.
4. Determinar el riesgo sin considerar medidas de control/prevención.
5. Determinar el riesgo considerando las medidas de control propuestas.
6. Evaluar el impacto económico de las medidas de control propuestas.
7. Comparar mejoras en la evaluación del riesgo vs. impacto económico producto de las medidas de control propuestas. Optimizar.
8. Analizar la situación y proponer nuevas mejoras (de ser necesario) para lograr niveles de riesgo aceptables.

EJEMPLO. Consideremos una situación de catástrofe ocasionada por la liberación de una nube de gas tóxico sobre una población lindera a las instalaciones donde ocurre. En este caso, la ecuación para el análisis de la situación se define por la liberación propiamente dicha y los factores externos que inciden en los resultados. En este caso, y para centrar el ejemplo exclusivamente en la metodología de determinación de la frecuencia de ocurrencia, se limitarán las variables a solo dos. Entonces se tiene:

$$F_{HS} = F_{FA} \cdot P_{DV} \quad (1)$$

Donde,

F_{HS} : Frecuencia de ocurrencia del suceso (año⁻¹)

F_{FA} : Frecuencia de falla que provoque liberación de la nube contaminante

P_{DV} : Probabilidad de la dirección del viento



Ahora bien, consideremos el *Riesgo Total* al que está sujeto esa población debido a la instalación vecina (en este caso se contemplan todos los riesgos a los que está expuesta la población, es decir, las catástrofes posibles que pueden afectarla, no solo la liberación de nube tóxica).

$$R_{HSj} = F_{HSj} \cdot P_F \quad (2)$$

$$R_T = \sum_j^N R_{HSj} \quad (3)$$

Donde,

R_{HSj} : Riesgo debido a un escenario j (como puede ser el antes expuesto)

F_{HSj} : Frecuencia de ocurrencia del evento j

P_F : Probabilidad de fatalidad ocasionada por j

R_T : Riesgo Total

El termino en estudio en los próximos capítulos y el objeto general del presente trabajo será la tasa de falla de los elementos constitutivos de un sistema y del sistema en general, representado en la ecuación (1) por F_{FA} . Este término se ha estudiado en profundidad desde comienzos del siglo pasado en busca de mejorar la calidad de productos y procesos, la fiabilidad de material bélico y en el mundo del mantenimiento predictivo para reducir los costos de reparación, tiempos perdidos, etc.

Si bien el Análisis de Riesgos es una materia relativamente nueva en el mundo de la ingeniería, se vale de estudios precedentes como herramientas para robustecer conceptos y tomar decisiones que permitan lograr los objetivos propuestos.

3.2 - Falla

El concepto de *falla* debe ser entendido de manera clara. Para esto, se define de la siguiente manera:

No conformidad con algún criterio de rendimiento definido.

Se considera la siguiente ilustración:

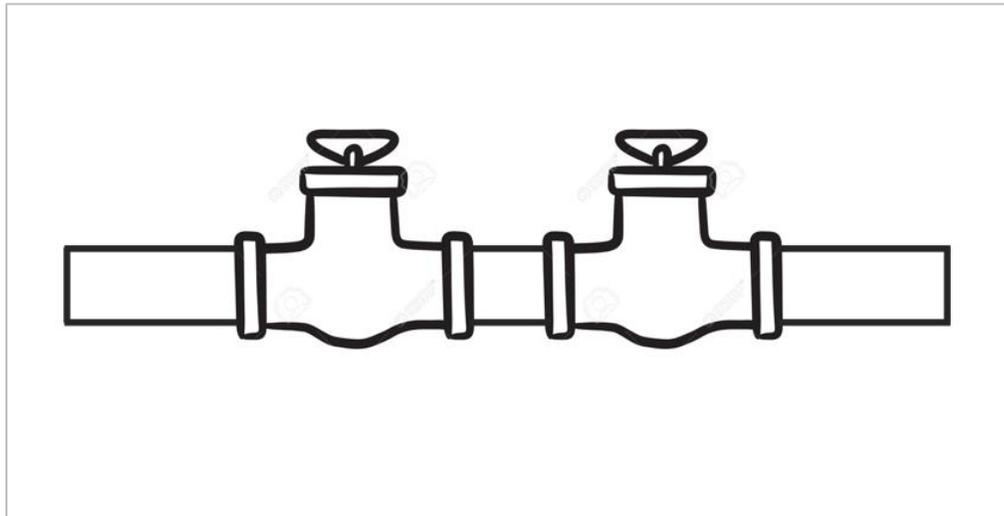


Ilustración 3-1 Sistema de válvulas en serie

Acá se muestran dos válvulas idénticas en serie. Suponiendo que la tasa de falla de una válvula es de 15 fallas / 1.10^6 hs. Podríamos inferir que la tasa de falla del sistema es de 30 fallas / 1.10^6 hs. Ahora bien, no siempre es así de fácil. La tasa de falla de un sistema depende de la naturaleza de su configuración.

Supongamos que consideramos como falla del sistema de la ilustración precedente la pérdida de suministro. Nos podemos preguntar: ¿las 15 fallas / 1.10^6 hs. implican pérdida de suministro? De hecho, muchos tipos de fallas están incluidas en esa tasa. Eso se puede ver en el siguiente detalle de las fallas de la válvula:



Tasa de falla de válvula:⁶

Falla en el cierre/suministro:	7
Perdida por goteo:	4
Retardo en apertura/cierre:	2
Interruptor de límite no funciona:	2
Total:	15

Como se puede observar en la tabla, las fallas que pueden provocar la pérdida de suministro tienen una tasa de 7 fallas / $1 \cdot 10^6$ hs. El resto identificado en la tabla, no implican una falla para el análisis que se está llevando a cabo.

Supongamos ahora, que la falla considerada lleva a una sobrepresión del sistema. En este caso, la confiabilidad del sistema se ve afectado por su configuración. En lugar de aumentar la tasa de falla, esta disminuye, porque para que ocurra la sobrepresión, ambas válvulas deben fallar. En este caso, la disposición en serie de las válvulas le da robustez al sistema.

Lo más importante de resaltar en todo esto es que la definición del tipo de falla define la confiabilidad del sistema y condiciona la información requerida para determinarla.

Ahora se definen otros conceptos que van a ser útiles:

Confiabilidad: La probabilidad de que un artículo realice una función requerida, bajo condiciones establecidas, por un período de tiempo establecido.

Mantenibilidad: La probabilidad de que un artículo fallido se restablezca a la efectividad operativa dentro de un período de tiempo dado cuando la acción de reparación se realiza de acuerdo con los procedimientos establecidos

La tasa de falla se define *para un período establecido en la vida de un artículo como la relación del número total de fallas en el tiempo total acumulado observado*, y se simboliza con la letra griega λ . Supongamos que tenemos un elemento de un sistema que en un período de tiempo T ha fallado k cantidad de veces, entonces queda:

⁶ (Smith, 2001)



$$\lambda = \frac{k}{T} \quad ; \quad [\lambda] = t^{-1} \text{ o nro. de fallas / 1.000 hs.}$$

Se puede ver que el valor de λ es un valor promedio en el período de tiempo estudiado. Es decir, el valor puede ser el mismo para tasas de falla crecientes, decrecientes o constantes. Este análisis refleja que el termino *Tasa de Falla* es representativo sólo cuando las fallas del sistema se dan de manera constante.

El tiempo medio entre fallas (MTBF) se define *para un período establecido en la vida de un sistema como el valor medio del período de tiempo entre fallas consecutivas, calculado como la relación entre el tiempo total acumulado observado y el número total de fallas*, y se simboliza con la letra griega θ . Se puede calcular de la siguiente manera:

$$\theta = \frac{T}{k} \quad ; \quad [\theta] = t$$

Considerando los conceptos anteriores, podemos inferir que:

$$\theta = \frac{1}{\lambda}$$

El termino tiempo medio hasta la falla (MTTF) se define *para un período establecido en la vida de un artículo, la relación entre el tiempo acumulado y el número total de fallas*. Si bien parece un concepto análogo a MTBF, la diferencia es que el MTTF aplica a elementos que no pueden ser reparados (ej.: transistor).

La vida media se define como *el tiempo medio hasta una falla considerado aceptable*. Este concepto puede sonar similar a MTBF y MTTF, pero existe una diferencia. Estos últimos pueden ser calculados para cualquier intervalo de tiempo (ej. para intervalo donde la tasa de falla es constante), mientras que la vida media se debe calcular para el período de tiempo completo. Esto induce a que Vida Media, MTBF y MTTF serán iguales si la tasa de fallas del sistema es constante.

3.2.1 - Diferencia entre Peligro y Riesgo

Los términos MTBF y Tasa de Falla pueden ser aplicados para elementos cuya falla implique un peligro. El término *PELIGRO* describe una situación con potencial de lesión o fatalidad, siendo la *FALLA* el evento, sea este peligroso o no. El termino *RIESGO* cubre dos parámetros.



Por un lado, la *probabilidad* (o tasa) de un evento particular. El segundo es la *escala de la consecuencia* de ocurrencia del evento, como ya se vio en 3.1.

3.3 – Interrelación de términos

Consideremos las probabilidades de falla de un elemento en un intervalo de tiempo (t ; $t+dt$). Podemos describirlo de 2 maneras:

1. La probabilidad de falla en el intervalo de tiempo t y $t+dt$, considerando que no ha habido fallas hasta t , es:

$$\lambda(t)dt \quad ; \quad \text{donde } \lambda(t) \text{ es la tasa de falla}$$

2. La probabilidad de falla en el intervalo de tiempo t y $t+dt$, sin consideraciones previas, es:

$$f(t)dt \quad ; \quad \text{donde } f(t) \text{ es la función densidad de probabilidad de falla}$$

La probabilidad que no ocurran fallas hasta el instante t ya se definió como confiabilidad, $R(t)$. Entonces, podemos definir:

$$\lambda(t)dt = \frac{f(t)dt}{R(t)} \quad ; \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

3.4 – Curva de la Bañera

Existe una curva, llamada curva de la bañera, que describe la variación de la Tasa de Falla de un elemento durante su vida. En un primer período la tasa es decreciente, debido a las fallas de puesta en marcha o de comienzo. El período siguiente, más prolongado, se refiere a la vida útil del elemento y se considera que la tasa de falla permanece constante. La última porción de la curva refiere al final de la vida útil del elemento, producto del desgaste, que incrementa la tasa de falla.

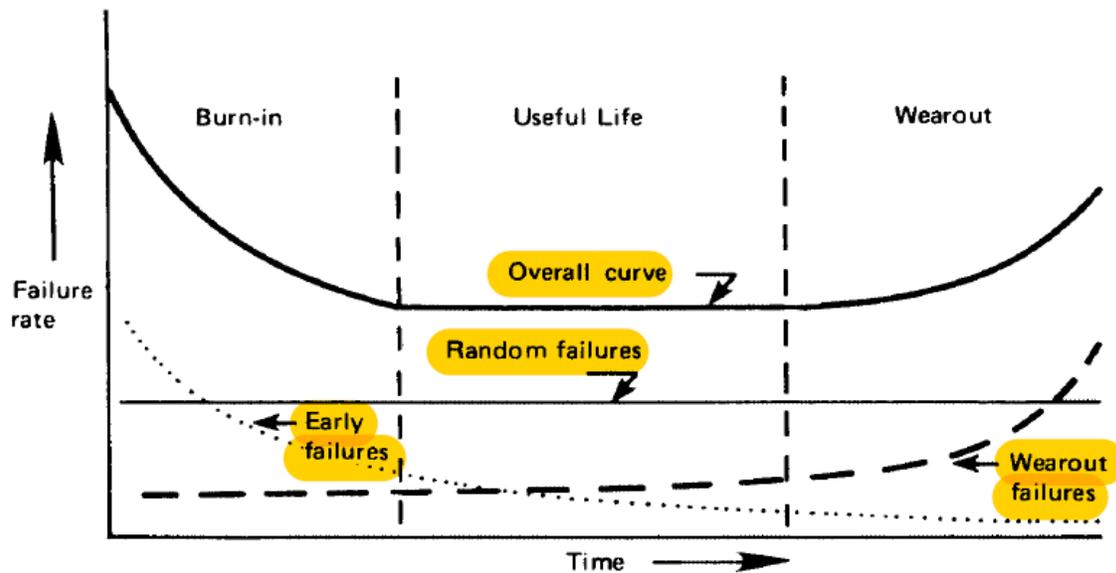


Ilustración 3-2 Curva de la Bañera

La curva Overall es resultado de la suma de las 3 curvas antes mencionadas:

- Early Failure: falla temprana, producto de la instalación, calibración, puesta en marcha. Es una curva decreciente. Generalmente relacionado con la fabricación y el control de calidad, como pueden ser soldaduras, juntas, conexiones, envolturas, suciedad, impurezas, grietas, defectos de aislamiento o revestimiento, incorrectos ajuste o posicionamiento, etc.
- Random Failure: falla aleatoria, propia del elemento, en condiciones normales de trabajo. Es una recta, un valor relativamente constante en el tiempo. Por lo general, se supone que son fallas relacionadas con el estrés.
- Wearout Failure: falla de desgaste, del final del ciclo de vida del elemento, una curva en aumento. Debido a la corrosión, oxidación, ruptura del aislamiento, desgaste por fricción, contracción, fatiga, etc. Supone necesidad de recambio del elemento.



4 – Calculo Estadístico e Interpretación

4.1 – Predicciones para Tasa de Falla Constante

Anteriormente, en 3.2, se definió el concepto de *Tasa de Falla* como el cociente entre el número total de fallas observadas (k) sobre el tiempo del análisis (T).

Si k es un valor grande, mayor a 10 para poner un valor, entonces la inexactitud en el proceso de muestreo se puede ignorar. Entonces, como ya se ha definido:

$$\lambda = k / T \quad \text{y} \quad \theta = T / k$$

Ahora bien, cuando k es cercano (o incluso igual) a 0 es necesario realizar un análisis estadístico más detallado para lograr conclusiones confiables. Este tipo de experiencias se da al momento del testeado de piezas por el fabricante para determinar la confiabilidad de su producto.

Si el fabricante de cierto equipo realiza una prueba sobre N elementos donde ocurren k fallas en un tiempo acumulado T , el valor de MTBF ($\hat{\theta}$) será T/k . Si se repite la prueba, se obtiene un nuevo resultado para T/k , que, muy a lo mejor, no será exactamente igual al anterior. De hecho, habrá tantos valores de MTBF como pruebas realizadas. Como estos valores son resultados de muestras, se los denomina *estimados* y llevan el símbolo $\hat{\cdot}$. La manera de obtener el verdadero valor de MTBF es realizar la prueba con todos los elementos. Este sería un método muy preciso, pero también muy costoso y poco productivo si la prueba requiere de un ensayo hasta la ruptura. Al final del análisis, se tendría un valor muy preciso de las fallas, pero ningún producto para comercializar. Por esto, la expresión teórica de MTBF es:

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} \frac{N_s(t)}{N} dt$$

Donde N_s es la cantidad de elementos que llegan sin falla al tiempo t .

En la práctica se truncan los testeos después de un número dado de horas o fallas.

El proceso de determinación de características de una población a partir de evidencias de una muestra se llama *Inferencia estadística* y consiste en seleccionar una distribución matemática

que se ajuste a los datos muestreados. Entonces, las propiedades de esta distribución matemática se aplican al sistema en estudio.

En el caso de MTBF se puede aprovechar esta herramienta estadística utilizando la expresión:

$$\frac{2k\hat{\theta}}{\theta}$$

Esta expresión sigue la *Distribución de Pearson*⁷, llamada también chi-cuadrado, con un grado de libertad igual a $2k$, donde la prueba se trunca al k -ésimo fallo. Ya se ha definido que:

$$\hat{\theta} = \frac{T}{k} = \frac{\text{Tiempo acumulado de prueba}}{\text{Nro. de fallas}}$$

Entonces,

$$\frac{2k\hat{\theta}}{\theta} = \frac{2kT}{k\theta} = \frac{2T}{\theta} \quad (1)$$

Podemos concluir que $2T/\theta$ sigue la distribución de Pearson. La figura siguiente muestra la distribución chi-cuadrado:

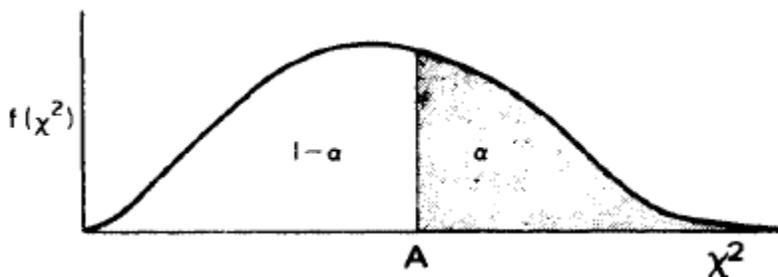


Ilustración 4-1 Función Chi-cuadrado

El área sombreada representa la probabilidad de exceder el valor A de la función. Para determinar un valor de chi-cuadrado es necesario especificar dos parámetros. El primero es el

⁷ Se describe brevemente en Anexo I.



número de *grados de libertad*, que será $2k$, y el segundo es el nivel de confianza de la predicción. Existen tablas de Chi-cuadrado para determinar estos valores⁸.

En la figura anterior, si α es el área a la derecha de A , entonces $1-\alpha$ será el nivel de confianza de θ . Si se necesita determinar valores con una probabilidad del 60%, el límite inferior será ese valor al que el MTBF exceda 6 de cada 10 veces. Como el nivel de confianza se obtiene como $2k$ y $\alpha = (1- 0,6) = 0,4$ entonces un valor para chi-cuadrado se obtiene desde las tablas mencionadas.

De la ecuación (1) se deduce $2T/\chi^2$ y ahora se puede determinar un valor para MTBF con un nivel de confianza del 60%. En otras palabras, un valor igual o mayor de MTBF que se observe el 60% de las veces. Se representa por $\theta_{60\%}$.

En un testeo de 100 dispositivos durante 1.000 hs., donde a cada falla se realiza un reemplazo inmediato, se observan 3 fallas. La tercera falla ocurra a las 1.000 hs., justo donde se corta el testeo. Se calcula el MTBF para la muestra con un 90% y 60% de confianza.

1. T se obtiene de multiplicar el número total de dispositivos testeados (100) por las horas lineales (1000 hs.). $T = 100.000$ hs. y $k = 100$.
2. Grados de libertad: $n = 2k = 6$. Para nivel de confianza del 90%, entonces $\alpha = (1 - 0,9) = 0,1$ y para el 60%, $\alpha = (1 - 0,6) = 0,4$.
3. Entrando en la tabla de Chi-cuadrado con los valores de n y α calculados, se obtienen valores 10,6 y 6,21 respectivamente para χ^2 .
4. $\theta_{90\%} = 2 \times 100.000$ hs. / 10,6 = 18.900 hs.
 $\theta_{60\%} = 2 \times 100.000$ hs. / 6,21 = 32.200 hs.
5. Interpretación del resultado. Al testear 100 dispositivos, se determina que 90 superaron las 18.900 hs. sin falla, y 60 superaron 32.200 hs. sin registrar falla.

Si comparamos estos resultados con la primera definición de $MTBF = T / k = 100.000 / 3 = 33.333$ hs. Si se hace el proceso inverso para determinar el nivel de confiabilidad que realmente aplica, entonces $\chi^2 = 2T/\theta = 200.000$ hs / 33.333 hs. = 6. Con este valor y $n = 6$ se obtiene de

⁸ Se adjuntan tablas en Anexo I.

la tabla el valor de α algo mayor a 0,4. Entonces, el nivel de confianza con el cual MTBF es 33.333 hs. es algo menor al 60%.

En el ejemplo anterior el testeo se cortó cuando ocurrió el tercer fallo. En caso de cortarse al llegar a un tiempo preestablecido, se debe considerar una falla más de las efectivamente detectadas. Esto se debe a que es necesario considerar que, si el testeo se hubiera prolongado unos segundos más, una nueva falla podría haber aparecido. Esta salvedad permite interpretar un testeo con cero fallas.

Considere 100 dispositivos testeados por 50 hs. que no presentan falla. Para un nivel de confianza de la predicción de 60% tenemos $\theta_{60\%} = 2T/\chi^2 = 2 \times 50 \times 100 \text{ hs.} / \chi^2$. Se define $\alpha = 0,4$ y $n = 2(k + 1) = 2$, entonces $\chi^2 = 1,83$ y $\theta_{60\%} = 10.000 \text{ hs.} / 1,83 = 5.464 \text{ hs.}$

Si se considera un pedido del cliente de dispositivos que no fallen (MTBF) antes de las 20.000 hs. de uso, se tiene $\chi^2 = 2T/\theta = 20.000 / 20.000 = 1$. Esto ocurre con $\alpha = 0,6$, por lo que el nivel de confianza de la predicción será del 40%. Interpretando este resultado, se le puede asegurar al cliente que el 40% de los dispositivos que se le entreguen tendrán un MTBF de 20.000 hs.

4.2 – Niveles de Confianza con doble límite

En alguna ocasión no alcanza con definir a MTBF como un valor mínimo, sino que se requiere también un valor máximo. En este caso $\alpha = (1 - \text{nivel de confianza})$ y se representa:

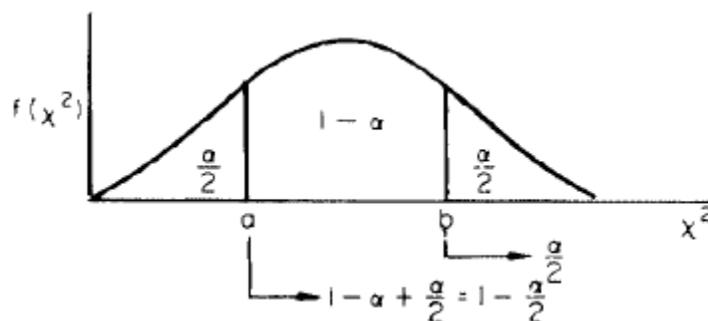


Ilustración 4-2 Chi-cuadrado con doble límite



Los dos valores de χ^2 se obtienen ingresando a la tabla de *Distribución de Pearson* dos veces. Primero con $n = 2k$ y $1 - \alpha/2$ para obtener el límite inferior de χ^2 y luego con $n = 2k$ y $\alpha/2$ para el límite superior de χ^2 . El valor superior de χ^2 corresponde al valor inferior de MTBF y viceversa, por ser el cociente en la ecuación para determinar θ ($\theta = 2T / \chi^2$).

Ahora se determinan los valores superiores de MTBF con un nivel de confianza del 80%. En otras palabras, se determinará la franja de horas de MTBF para los cuales el 80% de los dispositivos fallen en dicho rango. Para $T = 100.000$ hs. y $k = 3$, se obtienen los valores de χ^2 :

$$n = 6 ; \alpha = 0,9 ; \chi^2 = 2,2 ; \text{MTBF}_1 = 90.909 \text{ hs.}$$

$$n = 8 ; \alpha = 0,1 ; \chi^2 = 13,4 ; \text{MTBF}_2 = 14.925 \text{ hs.}$$

Se puede interpretar que el 80% de los dispositivos fallarán entre las 14.925 y 90.909 hs. de funcionamiento.

Para resumir el proceso de Inferencia de fallas de un dispositivo basado en testeo, se consideran los siguientes pasos:

1. Realizar el testeo y determinar T (horas de funcionamiento acumuladas) y k (número de fallas);
2. Seleccionar un nivel de confianza de la predicción y calcular $\alpha = (1 - \text{nivel de confianza})$;
3. Calcular $n = 2k$ ($2k + 2$ para calcular MTBF inferior cuando el testeo finaliza por tiempo y no por número de fallas);
4. Ir a las tablas de Chi-cuadrado para obtener χ^2 ;
5. Calcular el valor de MTBF para el nivel de confianza dado siguiendo $\text{MTBF} = 2T / \chi^2$;
6. En el caso de doble límite (inferior y superior), considerar:
 - a. $n = 2k ; \alpha^* = 1 - \alpha / 2$
 - b. $n = 2k$ (o $2k + 2$) ; $\alpha^* = \alpha / 2$

Las herramientas descritas permiten al fabricante determinar la tasa de fallas y el tiempo entre fallas de manera de superar ciertas dificultades propias de los escenarios de muestreo. De esta manera, el usuario puede obtener información precisa para el análisis de riesgos y realizar programas de mantenimiento basado en confiabilidad a partir de datos provistos por el proveedor, sin la necesidad de implementar un sistema de toma de datos propios o recurrir a



una Base de Datos externa. Como contrapartida, la información otorgada por el fabricante es obtenida de ambientes “ideales”. Esto quiere decir que no se consideran las condiciones de trabajo reales, donde va a operar el equipo en las instalaciones del cliente. Para poder considerar los factores ambientales, es necesario obtener información de campo. Esta situación se aborda en los capítulos siguientes.



5 – Bases de Datos de Fallas

5.1 – Introducción a las Bases de Datos

Existen, en el mundo de las ingenierías, diversas bases de datos de tasa de falla, compiladas por organismos de defensas, telecomunicaciones, industriales, de energía, etc. Algunas de ellas fueron publicadas y se encuentran disponibles.

Las bases de datos de fallas hacen referencia, a menos que se explicita, a tasas de fallas aleatorias, producto del uso normal del elemento. Al momento de utilizar las bases de datos de fallas es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones, que pueden derivar en variaciones importantes en los resultados obtenidos:

1. Algunas bases de datos pueden incluir elementos reemplazados durante mantenimiento preventivo, mientras otras no. Estos ítems deberían ser excluidos de los análisis, pero suele ser complicado. Estas diferencias pueden impactar seriamente en los resultados estadísticos en el orden de magnitud.
2. La tasa de falla se ve afectada por la tolerancia y esto va a ocasionar una variación en los valores relevados. Como la definición de falla puede variar para cada observador, un cierto desvío de un parámetro de control puede ser incluido como falla en una base de datos, pero ser desestimado en otra.
3. Las condiciones ambientales en las que trabaja un elemento generalmente son descritas en las bases de datos, pero los parámetros que se ven afectadas por estas suelen ser otra fuente de variación.
4. El reemplazo de piezas como prueba y error para determinar la falla de un elemento es una práctica que puede inflar artificialmente la tasa de falla.

Por lo tanto, las tasas de falla citadas están influenciadas por la forma en que son interpretadas por un analista y pueden abarcar uno o dos órdenes de magnitud como resultado de diferentes combinaciones de los factores anteriores. Dicho esto, podemos concluir que la Tasa de Falla es, tal vez, uno de los parámetros de ingeniería menos preciso, por lo que el MTBF o cualquier otro indicador calculado, no debería ser tomado como un absoluto, pero si es una buena herramienta para tomar como guía.



5.2 – Fuentes de Datos y Rangos

Las bases de datos de tasa de falla pueden clasificarse según el origen de la información:

1. **ESPECÍFICO:** datos recolectados de equipos similares, usados en instalaciones similares y en ambientes similares.
2. **INDUSTRIAL:** bases de datos de origen industrial, específicos para una actividad en particular.
3. **GENÉRICO:** una fuente genérica de datos combina un gran número de fuentes diversas.

Existen bases de datos que presentan valores muy similares, y otras presentan diferencias importantes, por esa subjetividad que ya se describió. Es por esto por lo que suele presentarse la tasa de falla no como un valor único, sino como un rango. Las diferentes bases de datos pueden presentar los valores de la siguiente manera:

1. Valor único, donde se logra cierta unanimidad en los resultados. Este valor es producto del promedio de los datos, siempre y cuando la dispersión de estos lo permita.
2. Dos valores indicando rango: Este rango puede ser, incluso, de un orden de magnitud, dejando al mejor juicio profesional la determinación del valor a utilizar, analizando las cuestiones propias del sistema en estudio. Suelen algunas bases de datos incluso determinar, dentro del rango, un valor que indica predominancia.
3. Tres valores indicando rango: Similar al anterior, se define un rango, que en este caso es mayor al orden de magnitud, y un valor intermedio que indica predominancia. La gran amplitud del rango en estos casos se da debido a que los datos fueron tomados bajo diferentes criterios, contemplando en algunos casos solo las fallas que provoquen resultados catastróficos, y en otros incluyendo fallas que reducen el rendimiento y que solo se identifican durante el mantenimiento preventivo.

A continuación, se desarrolla un ejemplo de la presentación de base de datos de tasa de fallas para una instalación de detección de escapes de Gas e Incendio.



	<i>Tasa de falla por millón de horas⁹</i>		
<i>Detector de humo por ionización</i>	1	6	40
<i>Detector ultravioleta</i>	5	8	20
<i>Detector infrarrojo</i>	2	7	50
<i>Detector por temperatura</i>	0.1	2	-
<i>Detector de llama</i>	1	10	200
<i>Detector de Gas IR</i>	1.5	5	80

En el caso de que el rango de falla presente un valor único, este se usa sin necesidad de juicio profesional, a menos que las condiciones de trabajo o del ambiente así lo ameriten.

En el caso de que el rango de falla presente 3 valores, y la diferencia no sea mayor al orden de magnitud, se usa el valor predominante como el más fiable, a no ser que por cuestiones de trabajo o ambientales sea conveniente utilizar otro valor. Acá entra en juego el concepto de juicio profesional.

Ahora bien, en caso de que el rango sea mayor al orden de magnitud, es necesario calcular el promedio geométrico. El uso de la media aritmética no es conveniente para determinar un valor representativo cuando el rango es tan amplio, ya que se favorece al valor más alto. La manera más fácil de graficarlo es a través de un ejemplo:

1. Media aritmética de n valores de λ_i viene dada por:

$$\sum_i^n \lambda_i / n$$

2. Media geométrica de n valores de λ_i viene dada por:

$$(\prod_i^n \lambda_i)^{1/n}$$

Consideremos el rango de tasa de falla de 0.1 y 1 (cada millón de horas). La media aritmética (0.55) es 5 veces el valor límite inferior del rango y solo la mitad del valor límite superior. Podemos decir entonces que, para rangos mayores al orden de magnitud, el valor superior tiene significativamente más peso en el valor medio aritmético.

⁹ (Smith, 2001)



La media geométrica (0.316) se encuentra igualmente relacionada con ambos valores por un factor de 3. Está relacionado con la media aritmética de los logaritmos, por lo que resulta en un valor más representativo para describir el rango.

5.3 – Limites de las predicciones

El autor David Smith (Smith, 2001) realizó un ejercicio comparando en 44 casos las fallas predichas en diversas bases de datos y las obtenidas efectivamente en el campo y llegó a los siguientes resultados:

1. Para predicciones usando base de datos *Específica*:

Se puede confiar un	Que los resultados prácticos serán mejor que:
95%	3,5 veces la tasa predicha
90%	2,5 veces la tasa predicha
60%	1,5 veces la tasa predicha

2. Para predicciones usando base de datos *Industrial*:

Se puede confiar un	Que los resultados prácticos serán mejor que:
95%	5 veces la tasa predicha
90%	4 veces la tasa predicha
60%	2,5 veces la tasa predicha

3. Para predicciones usando base de datos *Genérica*:

Se puede confiar un	Que los resultados prácticos serán mejor que:
95%	8 veces la tasa predicha
90%	6 veces la tasa predicha
60%	3 veces la tasa predicha

En el caso de utilizar datos de dos fuentes distintas, una específica y otra genérica para determinar la tasa de falla de un elemento compuesto por más de un componente, es necesario



calcular un nuevo rango, dada la diferencia de valores de predicción o confiabilidad de estas. En este caso, considerando $Rango_e$ y $Rango_g$ como los rangos de predicciones de fuentes específicas y genéricas, la predicción del rango para el elemento en estudio será:

$$\frac{(\Sigma\lambda_e \cdot Rango_e) + (\Sigma\lambda_g \cdot Rango_g)}{\Sigma\lambda_e + \Sigma\lambda_g}$$

Por ejemplo, considerando las tablas anteriores, usando los rangos de confiabilidad de 95% para los datos Específicos y Genéricos, y siendo $\Sigma\lambda_e = 20$ (pmh) y $\Sigma\lambda_g = 20$ (pmh), las predicciones serán:

$$\frac{(30 \times 3,5) + (100 \times 8)}{120} = 7,25$$

Podemos concluir, sin demasiada sorpresa, que los datos más fiables y los rangos de probabilidad de tasa de falla más estrechos se logran utilizando bases de datos específicas por sobre industriales o genéricas (esta última la que nos brinda menos precisión).

En la práctica, la tasa de falla es un efecto a nivel del sistema. Está estrechamente relacionado, pero no del todo explicado por la falla de un componente. Una proporción significativa de fallas encontradas con los sistemas electrónicos modernos no son el resultado directo de fallas de partes sino de interacciones más complejas dentro del sistema. La razón surge de efectos tales como factores humanos, software, interferencia ambiental, etc.

La predicción de fallas, basado en el análisis de las tasas de fallas, incluye tantos potenciales parámetros que es virtualmente imposible diseñar un modelo estandarizado y repetible, que se adopte en circunstancias diversas, para calcular tasas de falla.

5.4 – Manuales de Bases de Datos

La colaboración conjunta de instituciones que trabajan en un mismo campo de la industria se da de manera frecuente. Estas alianzas logran avances y resultados que difícilmente se puedan lograr de manera aislada. Se han desarrollado, como fruto de estas relaciones sinérgicas, diversos *Manuales de Datos* que permiten a las diferentes industrias disponer de equipos y sistemas más confiables.

Estos Manuales tienen como objetivo principal contribuir a un diseño y operación segura y eficiente de las plantas industriales, a través de la recolección y análisis de datos de mantenimiento y operación, una base de datos de confiabilidad de alta calidad y el intercambio de tecnología de confiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad entre las compañías del mismo sector o rubro, a través de la determinación de tasas promedio de fallas.

Un ejemplo de lo mencionado precedentemente es el desarrollo del Manual de Datos OREDA, proyecto que comienza a principios de la década del 80 por un número de petroleras que operaban en el Mar del Norte. El proyecto nace con la idea de estudiar la confiabilidad de equipos importantes bajo condiciones operativas.

El objetivo principal del Proyecto OREDA es recolectar datos de confiabilidad para equipos de seguridad, pero luego se fue extendiendo a otros tipos de equipos de la industria.

5.4.1 – Manejo de Información en Manual de Datos

La manipulación de la información suministrada por un *Manual de Datos* debe asegurar una interpretación acertada de las fallas y una publicación organizada de ellas. El manejo inadecuado o una interpretación equivocada de la información puede ocasionar accidentes catastróficos, además de paradas de planta no planeadas y aumento de costos.

Los diferentes Manuales presentan, para cada equipo, la siguiente información mínima:

- a. Una representación gráfica del equipo y sus límites
- b. Un listado de modos de fallas
- c. El número de fallas observadas para cada tipo de falla



- d. El tiempo en servicio para cada equipo
- e. Una Tasa de Falla calculada
- f. Un tiempo de reparación estimado¹⁰
- g. Tablas de Modo vs. Tipo de Fallas

La información volcada en estos tipos de manuales suele limitarse a componentes y sistemas mecánicos, dejando fuera el factor humano. Puede haber ciertas situaciones donde se observen fallas causadas por el factor humano, por lo que implícitamente algunos errores humanos estén incluidos en estos Manuales.

Los Manuales suelen clasificar los equipos por sistemas principales y cada uno de esos sistemas se divide en diferentes clases o subsistemas. Por supuesto, cada clasificación dependerá del tipo de industria y sistemas productivos en los que se encuadre dicho Manual. A continuación, y a modo de ejemplo, se detallan las cuatro Categorías y Clases del Manual OREDA:

SISTEMA	CLASE
Maquinaria	Compresores
	Turbinas de Gas
	Bombas
	Motores de Combustión
	Turboexpansores
Equipos Eléctricos	Generadores Eléctricos
	Motores Eléctricos
Equipos Mecánicos	Intercambiadores
	Vessels
	Calentadores y Calderas
Otros	Detectores de Fuego y Gas
	Sensores de Proceso

¹⁰ Este punto es importante para el área de mantenimiento y producción. En el caso del Análisis de Riesgos Ambientales, no nos interesa como prioridad el tiempo de reparación de una falla.



	Unidades de Control Lógico
	Válvulas

Dentro de cada Clase, los equipos se subclasifican según sus características de diseño o tipo de servicio, como pueden ser los compresores por tornillo, diafragma, etc. Dentro de cada subclasificación se divide en componentes, como sistemas de lubricación, eléctricos para luego llegar al nivel más bajo y se enumeran las partes elementales de los equipos que pueden fallar, como son válvulas, juntas, rodamientos, filtros, etc.

Los datos incluidos en los Manuales son los obtenidos durante la etapa de madurez o vida útil de los equipos, es decir, en la parte central de la [Curva de la Bañera](#). La etapa inicial, donde se observan fallas de instalación o calidad de los equipos, no es incluida en los Manuales. La mayoría de los componentes de los equipos de Manual son reemplazados o reparados antes de que lleguen a la etapa de vejez, por lo que esta etapa tampoco se tiene en cuenta, por lo que todos los datos de Manual se basan asumiendo que la tasa de falla es constante e independiente del tiempo. (Zapata, 2011)

5.4.2 – Tablas de Datos

Para cada equipo volcado en un Manual, se dispone de una tabla, con identificación y parámetros de confiabilidad, como pueden ser:

1. Identificación del equipo: suele ser numérica o alfanumérica
2. Cantidad de equipos tomados para las estimaciones
3. Cantidad de instalaciones que aportaron la información
4. Tiempo en servicio. Generalmente se detallan dos valores, tiempo calendario y tiempo de operación
5. Descripción breve de como ocurrió la falla
6. Número total de fallas para cada tipo de falla
7. Tasa de fallas
8. MTBF: número de fallas dividido tiempo de servicio



9. Tiempo de reparación: horas de trabajo efectivo requeridas para volver el equipo a funcionamiento luego de ocurrida la falla. No suelen contemplar tiempos de espera de repuestos, enfriamiento del equipo, etc. ya que dependerá de las condiciones particulares de cada organización.
10. Horas hombre necesarias para reparar el equipo

Se adjunta posible diseño de una Tabla de Datos.

Nro.: _____		Equipo: _____							
Población _____	Instalaciones _____	Tiempo en servicio (hs.)							
		Hs. Calendario: _____				Hs. Operativas: _____			
Modo de falla	Nro. de fallas	Tasa de falla				Hs. de reparación	Hs. hombre		
		Menor	Mayor	Promedio	MTBF		Menor	Mayor	Promedio
Comentarios:									

Tabla 5-1 Ejemplo de Tabla de Datos similar a la utilizada en Manual OREDA, orientada al Análisis de Riesgo Ambiental



5.4.3 – Tablas detalles

La tabla anterior muestra un resumen del funcionamiento y confiabilidad de un equipo, pero no muestra en que parte del equipo se presenta la falla. Para eso se confeccionan tablas anexas, que acompañan a la precedente para mejorar el nivel de detalle y definir el modo y el mecanismo de falla y como estos aportan a la tasa de falla del equipo.

Suelen confeccionarse dos tablas diferentes. En una se vuelca la tasa de falla por ítem del equipo y en la otra la tasa por cada mecanismo de falla.

Cabe aclarar que el mecanismo de falla se define como la causa aparente o inmediata de la falla refiriéndose al nivel más bajo de la jerarquía. El modo de falla (efecto en el cual se observa la falla) es, entonces, el efecto directo del mecanismo de falla. Y este será la causa directa del modo. (OREDA, 2015)

Nro.: Equipo:		Modo de falla									Total
		AIR	BRD	ELP	ELU	ERO	FTS	HIG	INL	LOO	
ítem	Buffer	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,12
	Cojinete	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,03
	Válvula	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,07
	Filtros	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,07	0,00	0,03	0,00	0,16
	Enfriador	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Comando	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		0,04	0,00	0,00	0,2	0,10	0,12	0,00	0,10	0,00	

Tabla 5-2 Ítems de un equipo vs. Modos de Falla en porcentajes



Nro.:		Modo de Falla									Total
		AIR	BRD	ELP	ELU	ERO	FTS	HIG	INL	LOO	
Mecanismo de Falla	Corrosión	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,07
	Deformación	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,08
	Erosión	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,09
	Fatiga	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,05
	Goteo	0,00	0,04	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08
	Recalentamiento	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00	0,10
Total		0,02	0,05	0,02	0,05	0,06	0,10	0,04	0,05	0,08	

Tabla 5-3 Mecanismos de Fallas vs. Modos de Fallas en porcentaje

Las tablas anteriores son extractos del Manual OREDA, obtenidas de la bibliografía consultada.

Las siglas de los Modos de Fallas significan:

AIR: Lectura anormal del instrumento

BRD: Descompostura

ELP: Fuga externa en proceso

ELU: Fuga externa en utilidad

ERO: Comportamiento errático

FTS: Falla en el arranque

HIG: Rendimiento sobreelevado

INL: Válvula gotea en posición cerrado

LOO: Bajo rendimiento



La Organización de Datos OREDA ya tiene una estructura formal que fue tomando y mejorando con el correr de los años. La gran cantidad de datos que manipula debe organizarse de manera ordenada y eficiente a fin de resultar en una herramienta útil para sus colaboradores y quienes deseen utilizarlo. En las tablas del Manual los valores se presentan con dos decimales para mantener el formato.



6 – Sistemas Propios de Toma de Datos

Uno de los principales inconvenientes en la obtención de datos de fallas es que no se reconoce la importancia del registro de datos sistemático y ordenado bajo un único criterio. La falta de un uso prolongado en el tiempo de los registros de toma de datos dificulta establecer mecanismos de comparación de los indicadores de confiabilidad y frecuencia de falla. Esto se evidencia en la falta de rigor en la recolección y registro de datos que permitan alimentar cálculos estadísticos predictivos fundamentales para el análisis y la toma de decisiones.

El *Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM)*, siendo una metodología de análisis sistemática, objetiva y documentada, puede ser aplicada a cualquier tipo de instalación industrial, siendo una herramienta fundamental en el estudio de los sistemas y como estos pueden fallar funcionalmente. Cabe aclarar que este sistema se centra en estudiar la falla y no las consecuencias de ella.

El éxito del *RCM* depende en gran medida de la disponibilidad de datos de calidad, información difícil de encontrar o elaborar en la mayoría de las plantas. La división de las instalaciones en Sistemas y Sub-Sistemas es muy amplia y queda a criterio del equipo de trabajo. También lo es la profundidad de análisis para cada Modo de Falla y sus causas. (Troffe, 2009)

Es por este motivo que la International Organization for Standardization desarrolló la Norma ISO 14.224

6.1 – Norma Internacional ISO 14.224

Esta Norma brinda una base para la recolección de datos de confiabilidad y mantenimiento de forma estándar para las áreas de perforación, producción, refinación y transporte de petróleo y gas natural, con criterios que *pueden extenderse a otras industrias e instalaciones*.

Presenta los lineamientos para la especificación, recolección y aseguramiento de la calidad de los datos que permitan cuantificar la confiabilidad de equipos y compararla con la de otros de características similares. De hecho, esta herramienta es la base de información para el posterior desarrollo de Manuales de Datos, como se vio en el capítulo anterior.



Los principales objetivos de la Norma ISO 14224 son:

- I. Especificar los datos que serán recolectados para el análisis de:
 - a. Diseño y configuración del Sistema
 - b. Seguridad, confiabilidad y disponibilidad de los Sistemas o Plantas
 - c. Costo del Ciclo de Vida
 - d. Planeamiento, optimización y ejecución del Mantenimiento
- II. Especificar datos en formato normalizado, a fin de:
 - a. Permitir el intercambio de datos entre Plantas
 - b. Asegurar que los datos sean de calidad suficiente para el análisis que se pretende realizar

La Norma está orientada al registro de fallas, comenzando el análisis desde el *Modo de Fallas*, hasta la *Causa de Falla* y el *Ítem Mantenable* que la ocasiona. Esta estandarización de la información limita la profundidad de detalle del análisis.

6.1.1 – Estructura de Jerarquías

La Norma toma al equipo dividiéndolo en 4 categorías, que son:

1. Clases: Se las asocia a funciones en su contexto operacional. Las razones por las cuales un equipo existe dentro de un proceso (Ej. Sistemas de bombeo).
2. Unidad: Conjunto que realiza una función específica en un servicio determinado del proceso, pudiéndose identificar una entrada y una salida. Se incluye todos los equipos disponibles para la operación de estos (Ej. Sistema de Bombeo de red de incendio).
3. Sub-Unidad: Equipos que permiten que el Sistema realice sus funciones y se pueden dividir por sus funciones específicas. Todo Sub-Sistema que falle, afecta directamente al Sistema (Ej. Bomba, Motor, Encendido, etc.).
4. Ítems Mantenibles: Partes del equipo sobre las cuales es necesario realizar acciones de mantenimiento para alcanzar la confiabilidad deseada (Ej. Caja reductora).

6.1.2 – Límites de Equipos

El propósito de la definición de los límites es asegurar que se tenga una idea clara de que equipos se incluirán dentro del límite de un sistema particular. La Norma recomienda tres reglas para la definición de límites:

1. Excluir del límite de la unidad de equipo los aparatos conectados. Las averías que se presentan en una conexión y no pueden relacionarse exclusivamente con el aparato conectado deben incluirse dentro de los límites del equipo.
2. Cuando el motor y la unidad accionada utilicen una subunidad en común, relacionar una avería de esta subunidad con la unidad accionada.
3. Incluir instrumentación solo cuando esta tenga una función específica de control en la unidad de equipo respectiva. La instrumentación de control o monitoreo de carácter más general no se debe incluir dentro del límite de la unidad de equipo.

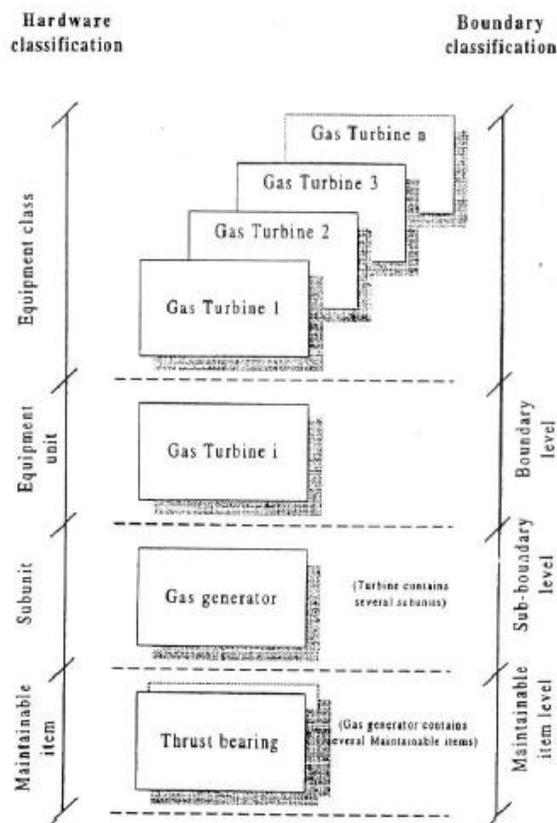


Figura 6-1 Ejemplo de clasificación y límites según Norma ISO 14224

6.1.3 – Estructura de la Información

La Norma clasifica la información en tres estructuras principales, que son:

1. Categoría de Datos: La Norma diferencia los datos acerca de:



- a. El equipo: Identificación, ubicación, clasificación, datos sobre la instalación, fabricante, características de diseño, datos de operación, características ambientales, etc.
 - b. Averías: Datos de identificación y registro de la avería. Datos de la avería para fines de la caracterización.
 - c. Datos de Mantenimiento: Parámetros del mantenimiento, fecha, categoría, actividad del mantenimiento. Aparatos a los que se les realizó mantenimiento, horas-hombre requeridas, tiempo fuera de funcionamiento, etc.
2. Formato de los Datos: La Norma define los atributos de los datos necesarios a la hora de relevar un equipo, una falla o tareas de mantenimiento. Los atributos se dan en las siguientes tablas:



Categorías Principales	Subcategorías	Datos
Identificación	Ubicación	Número de identificación del equipo
	Clasificación	Clase de unidad de equipo, como por ej. Compresor. Tipo de equipo Aplicación
	Datos de la instalación	Código o nombre de la instalación Categoría de la instalación (ej. Plataforma, equipo submarino, refinería, etc.) Categoría de operación Área geográfica donde se ubica la instalación
	Datos de la unidad de equipo	Descripción de la unidad de equipo Número de identificación único (puede ser el número de serie o número interno definido al momento de la instalación) Redundancia de la subunidad (cantidad de subunidades disponibles. Ej. Bombas en paralelo, backup, etc.)
Diseño	Datos del fabricante	Nombre del fabricante Designación del modelo del fabricante
	Características de diseño	Particular para cada clase de equipo. Ej. Capacidad, energía, velocidad, presión, caudal, etc.
Aplicación	Operación (uso normal)	Redundancia de la unidad de equipo Modo utilizado durante la fase operativa. Ej. Operación continua, estado de espera, abierto/cerrado, intermitente. Fecha en que se instaló el equipo o empezó la producción Período de monitoreo (tiempo calendario) Tiempo operativo acumulado durante período de monitoreo Número de demandas durante período de monitoreo (cuantas veces se utilizó, en caso de no ser operación continua) Parámetros operativos pertinentes a cada clase de equipo (ej. Energía operativa, velocidad operativa, caudal operativo, etc.)
	Factores ambientales	Condiciones ambientales externas ¹¹ Condiciones ambientales internas ¹²
Observaciones	Información adicional	Información adicional que puede surgir de diagramas de procesos, hojas de datos, sistema de mantenimiento, etc.

Tabla 6-2 Datos del Equipo según Norma ISO 14224



Categoría	Datos	Descripción
Identificación	Registro de averías	Identificación de averías únicas
	Ubicación del equipo	Número de identificación
Datos de la Avería	Fecha de la avería	Fecha de detección
	Modo de avería	A nivel de la unidad de equipo
	Impacto de la avería en el funcionamiento	Nula, Parcial o Total. También se pueden incluir consecuencias que afecten la seguridad del funcionamiento
	Clase de severidad	Efecto en el funcionamiento de la unidad del equipo. Puede ser Crítica o No Crítica
	Descriptor de avería	Según Tabla 6.8
	Causa de la avería	Según Tabla 6.9
	Subunidad averiada	Nombre de la unidad averiada
	Partes mantenibles averiadas	Especificación de partes mantenibles averiadas
	Método de observación	Como se detectó la avería (Según Tabla 6.10)
Observaciones	Información adicional	Más detalles, siendo posible, sobre las causas de la avería

Tabla 6-3 Datos de la Avería según Norma ISO 14224

¹¹ Características que deben considerarse porque afectan la unidad operativa, como ser grado de protección del recinto, vibración, neblina salina (en caso de encontrarse cercano al mar o atmosfera con contenido de sales) u otros fluidos externos corrosivos, polvo, calor, humedad.

¹² Condiciones internas de la operación. En caso de un compresor, por ejemplo, se debe considerar las condiciones del gas: benigno (limpio y seco), moderado (corrosión por gotas), severo (gas sulfuroso, alto contenido de partículas, etc.)



Categoría	Datos	Descripción
Identificación	Registro de mantenimiento	Identificación de avería única
	Ubicación del equipo	Nro. de identificación
	Registro de la avería	Identificación de la avería, solo en caso de mantenimiento correctivo
Datos del mantenimiento	Fecha del mantenimiento	Fecha en que se realizó el mantenimiento
	Categoría de mantenimiento	Correctivo o preventivo
	Actividad de mantenimiento	Descripción de la actividad de mantenimiento. Según Tabla 6.11
	Impacto del mantenimiento en el funcionamiento	Nula, parcial o total. También se pueden incluir consecuencias que impacten en la seguridad del funcionamiento
	Subunidad a la que se realizó mantenimiento	Nombre de la subunidad a la que se realizó mantenimiento ¹³
	Partes mantenibles a las que se realizó mantenimiento	Especificar a cuál o cuáles partes mantenibles se le realizó mantenimiento
Recursos de mantenimiento	Horas Hombre de mantenimiento	HH de mantenimiento por disciplina (mecánica, eléctrica, sistema informático, etc.)
	Total de HH de mantenimiento	Suma de horas hombre de todas las disciplinas.
Tiempo de Mantenimiento	Tiempo de mantenimiento activo	Duración del trabajo de mantenimiento activo realizado al equipo
	Tiempo de inactividad	Intervalo de tiempo en el cual el aparato está en estado de inactividad
Observaciones	Información adicional	Mas detalles, en caso de ser posible, sobre la tarea de mantenimiento, como, por ejemplo, tiempo de espera anormal, relación con otras tareas de mantenimiento

Tabla 6-4 Datos de Mantenimiento según Norma ISO 14224

3. Estructura de la Base de Datos: La Norma establece de forma general como debe ser la estructura para el almacenamiento y recuperación de los datos. Se grafica de la siguiente manera:

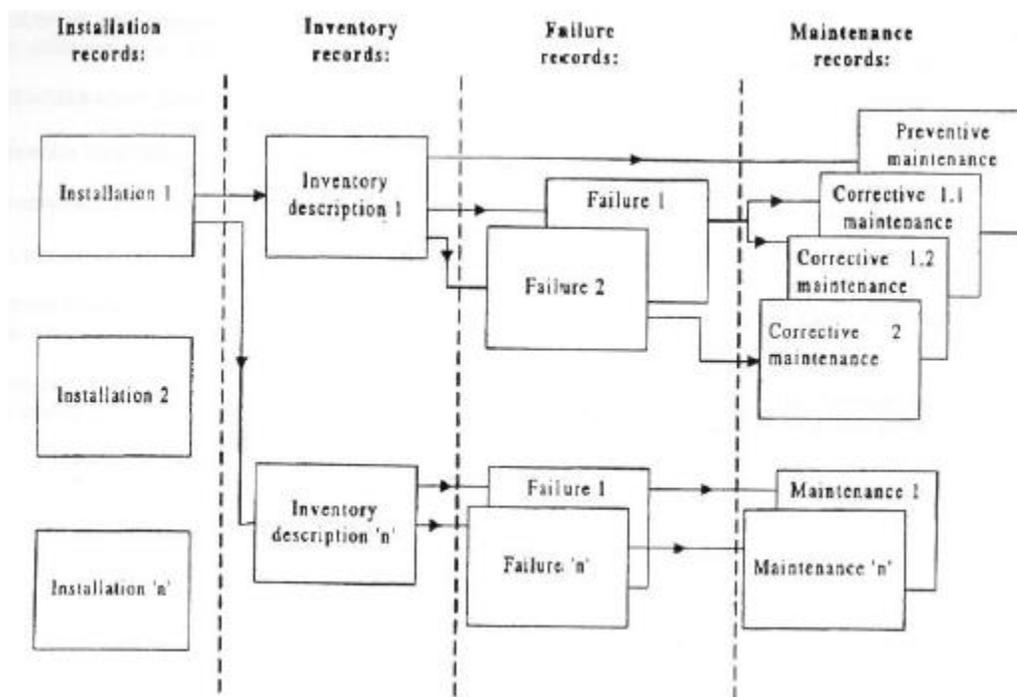


Figure 6-5 Ejemplo de estructura de Datos según Norma ISO 14224

La Norma define taxonomía, límites, clasificación y atributos que deberán considerarse para los equipos utilizados en las actividades que se encuentran dentro del alcance de la estandarización. A modo de ejemplo, se presenta a continuación el análisis completo de la Clase Motor de Combustión según Norma ISO 14224. Este análisis deberá realizarse para cada equipo de la industria en que se implemente.

1. Clasificación Taxonómica:

Clase de equipo		Tipo		Aplicación	
Descripción	Código	Descripción	Código	Descripción	Código
Motores de combustión – pistón (motores Diesel/gas)	CE	Motor Diesel	DE	Energía primaria	MP
		Motor a gas	GE	Energía esencial	EP
				Grupo electrógeno	EM
				Inyección de agua	WI
				Manipulación de petróleo	OH
				Manipulación de gas	GH
				Extintor de incendio con agua	FF
				Manipulación de materiales	MH

Tabla 6-6 Clasificación taxonómica de Motor de Combustión según Norma ISO 14224

2. Diagrama de Límites del equipo:

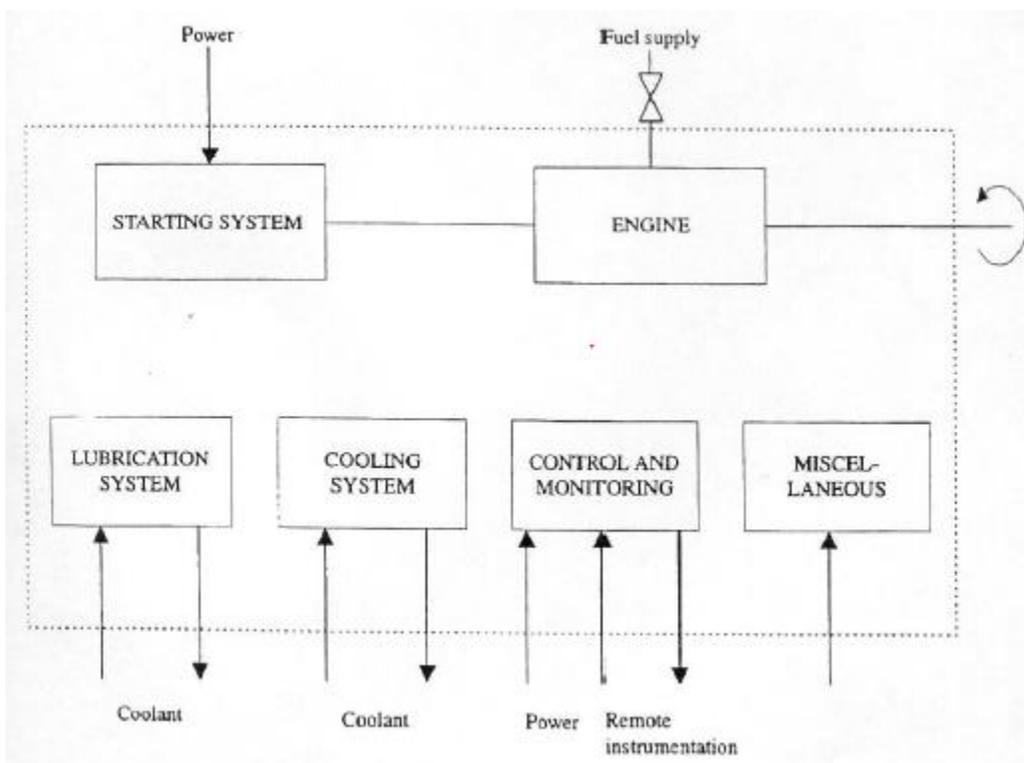


Figura 6-7 Límites de Unidad de Motor de Combustión según Norma ISO 14224



3. Sub-Unidad e Ítems Mantenibles:

Unidad de equipo	Motores de combustión					
Subunidad	Sistema de arranque	Unidad del motor de combustión	Control y monitoreo	Sistema de lubricación	Sistema de refrigeración	Misceláneos
Partes mantenibles	-Energía de arranque (batería, Aire) -Unidad de arranque -Control de arranque	-Entrada de aire -Turboalimentador -Bomba de combustible -Inyectores -Filtros de combustible -Sistema de escape -Cilindros -Pistones -Ejes -Cojinete de empuje -Cojinete radial -Sellos -Tuberías -Válvulas	-Dispositivo actuador de control -Válvulas -Suministro de energía interna	-Reservorio -Bomba con motor -Filtro -Refrigerador -Válvulas -Tubería -Control de temperatura	-Intercambiador de calor -Ventilador y motor -Filtro -Válvula -Tubería -Bomba -Control de temperatura	-Juntas de bridas -Capote -Otros

Tabla 6-8 Descripción de Sub-Unidad y Partes Mantenibles de Motor de Combustión según Norma ISO 14224



4. Datos del equipo:

Nombre	Descripción	Lista de unidades o códigos
Aplicación del motor	Nombre de la unidad accionada	Bomba, generador, compresor
Unidad accionada correspondiente	Número de identificación de la unidad accionada correspondiente	Numérica
Energía - Diseño	Energía de salida máxima nominal (diseño)	KW
Energía – Operación	Energía aproximada con la que se operó la unidad la mayor parte del tiempo de monitoreo	KW
Velocidad	Velocidad del diseño	Rpm
Número de cilindros	Cantidad de cilindros	Número entero
Configuración del cilindro	Tipo	En línea, en V, plano, etc.
Sistema de arranque	Tipo	Eléctrico, hidráulico, neumático
Combustible	Tipo	Gas, Nafta, Diesel, etc.
Tipo de filtración de entrada de aire	Tipo	
Tipo de aspiración del motor	Tipo de aspiración	Turbo, natural

Tabla 6-9 Datos Específicos de la Unidad de Equipo de Motor de Combustión según Norma ISO 14224

5. Datos sobre las posibles averías del equipo:



Unidad de equipo	Código	Definición	Descripción
Motor de Combustión	FTS	No arranca al momento de encender	Incapacidad para arrancar el motor
	STP	No se detiene al momento de apagar	Incapacidad para detener el motor o proceso incorrecto de interrupción
	SPS	Falsa parada	Interrupción inesperada del motor
	OWD	Opera sin accionar	Arranque no deseado
	BRD	Colapso	Daños graves (rotura, explosión, agarrotamiento, etc.)
	HIO	Alta energía de salida	Velocidad excesiva/energía de salida por encima de lo especificado
	LOO	Baja energía de salida	Energía de salida por debajo de lo especificado
	ERO	Energía de salida errática	Oscilante o fluctuante
	ELF	Fuga externa – combustible	Fuga externa de gas o diésel
	ELU	Fuga externa – medio de servicio	Fuga externa de aceite, líquido refrigerante
	INL	Fuga interna	Ej. Fuga de agua del refrigerador interno
	VIB	Vibración	Vibración excesiva
	NOI	Ruido	Ruido excesivo
	OHE	Sobrecalentamiento	Temperatura excesiva
	PDE	Desviación de parámetro	Parámetro monitoreado que excede el nivel de tolerancia
	AIR	Lectura anormal de instrumento	Ej. Falsa alarma, lectura errónea
	STD	Deficiencia estructural	Ej. Roturas en la tapa o soporte del cilindro
	SER	Problemas menores durante el funcionamiento	Partes sueltas, decoloración, suciedad, etc.
OTH	Otros		
UNK	Desconocido	Información inadecuada / No disponible	

Tabla 6-10 Modos de Averías de Motor de Combustión según Norma ISO 14224

6.1.4 – Estandarización de Averías y Mantenimiento

La Norma presenta listados, a modo informativo y para la orientación, con los diferentes tipos de averías más comunes que se pueden presentar, sus causas, el modo de detección de estas



y las acciones de mantenimiento para ser identificadas y volcadas en los registros de forma normalizada de manera de permitir la comparación entre equipos, sistemas, plantas y organizaciones.



Nro.	Anotación	Descripción
1.0	Avería mecánica – General	Avería relacionada con algún defecto mecánico, pero no se conocen los detalles
1.1	Fuga	Fugas externas e internas, líquidos o gases. Si el modo de avería indica fuga, se debe usar un descriptor de avería más orientado hacia la causa de esta, de ser posible
1.2	Vibración	Vibración anormal. Si el modo de avería indica vibración, se debe usar un descriptor de avería más orientado hacia la causa de esta, de ser posible
1.3	Avería por espacio libre/ alineamiento	Avería ocasionada por espacio libre o alineamiento deficiente
1.4	Deformación	Distorsión, dobladura, pandeo, abolladura, deformación, encogimiento, etc.
1.5	Aflojamiento	Desconexión, aparatos sueltos
1.6	Atascamiento	Atascamiento, agarrotamiento, atoramiento debida a otras razones que no sean deformaciones o averías por espacio libre o alineamiento deficiente.
2.0	Averías materiales - General	Avería relacionada con un defecto material, pero no se conocen los detalles
2.1	Cavitación	Aplicable a equipos como bombas y válvulas
2.2	Corrosión	Tanto húmeda (electroquímica) como seca (química)
2.3	Erosión	Desgaste erosivo
2.4	Desgaste	Desgaste abrasivo y adhesivo, por ej., arañazos, arrastre, fisuración, etc.
2.5	Ruptura	Fractura, ruptura, rajadura.
2.6	Fatiga	Si la causa de ruptura es fatiga, se usa este código
2.7	Sobrecalentamiento	Daño material por sobrecalentamiento/ quemadura
2.8	Estallido	Estallido, voladura, explosión, implosión de aparato.
3.0	Avería de instrumento – General	Avería relacionada con la instrumentación, pero no se conocen los detalles
3.1	Avería por control	
3.2	Sin señal/ indicación/ alarma	Sin señal/ indicación/ alarma cuando se espera
3.3	Señal/ indicación/ alarma defectuosa	La señal/ indicación/alarma no funciona correctamente en relación con el proceso en curso. Puede ser indebida, intermitente, oscilante, arbitraria



3.4	Desajuste	Error de calibración, desviación de parámetro
3.5	Falla del software	Control/ monitoreo/ operación defectuoso o inexistente
3.6	Avería en modo normal	Diversos aparatos con instrumentos fallan simultáneamente, por ej., detectores de incendio y gas redundantes
4.0	Avería eléctrica - General	Avería relacionada con el suministro y transmisión de energía eléctrica, pero no se conocen detalles
4.1	Corto circuito	
4.2	Circuito abierto	Desconexión, interrupción, línea o cable roto
4.3	Sin energía/ voltaje	Suministro de energía eléctrica faltante o insuficiente
4.4	Energía/ voltaje defectuoso	Suministro de energía eléctrica defectuoso, ej., sobrevoltaje
4.5	Falla en conexión a tierra/ aislamiento	Falla en conexión a tierra, baja resistencia eléctrica
5.0	Influencia externa – General	Averías causadas por eventos externos o sustancias fuera del límite, pero no se conocen detalles
5.1	Bloqueo/ atascamiento	Flujo restringido/ bloqueado debido a suciedad, contaminación, congelamiento, etc.
5.2	Contaminación	Fluido/ superficie contaminado, ej., aceite lubricador contaminado, cabezal detector de gas contaminado, etc.
5.3	Influencias externas varias	Objetos extraños, impactos, ambientales, influencia de sistemas colindantes
6.0	Varios – General	Descriptor que no caen en ninguna de las categorías descritas anteriormente
6.1	Desconocido	No hay información disponible al descriptor de averías

Tabla 6-11 Descriptor de Averías según Norma ISO 14224



Nro.	Anotación	Descripción
1.0	Causas relacionadas con el diseño – General	Avería relacionada con un diseño inadecuado para la operación y/o mantenimiento, pero no se conocen los detalles.
1.1	Capacidad inadecuada	Capacidad/ dimensiones inadecuada
1.2	Material inadecuado	Selección de material inadecuado
1.3	Diseño inadecuado	Diseño o configuración del equipo inadecuado (forma, tamaño, tecnología, configuración, operabilidad, mantenibilidad, etc.)
2.0	Causas relacionadas con la fabricación/ instalación – General	Avería relacionada con la fabricación o instalación, pero no se conocen detalles
2.1	Error de fabricación	Falla de fabricación o procesamiento
2.2	Error de instalación	Falla de instalación o ensamblaje (no se incluye ensamblaje después de mantenimiento)
3.0	Avería relacionada con la operación/ mantenimiento – General	Avería relacionada con operación/ uso o mantenimiento del equipo, pero no se conocen detalles
3.1	Servicio fuera de diseño	Condiciones de servicio no diseñadas o no planeadas, por ej., operación del compresor fuera de la envoltura, presión por encima de la especificación, etc.
3.2	Error operativo	Error, mal uso, negligencia, inadvertencia, etc., durante la operación
3.3	Error de mantenimiento	Confusión, error, negligencia, inadvertencia, etc., durante el mantenimiento
3.4	Desgaste esperado	Avería causada por el desgaste normal esperado producto de la operación normal de la unidad de equipo
4.0	Avería relacionada con la administración - General	Avería relacionada con algún sistema administrativo, pero no se conocen detalles
4.1	Error de documentación	Averías relacionadas con procedimientos, especificaciones, dibujos, reportes, etc.
4.2	Error de administración	Avería relacionada con planeamiento, organización, control/ certificación de calidad, etc.



5.0	Varios – General ¹⁴	Causas que no caen dentro de ninguna de las categorías previamente descritas
5.1	Desconocido	No hay información disponible con respecto a la causa de la avería

Tabla 6-12 Causas de las Averías según Norma ISO 14224

¹⁴ La persona a cargo de recoger los datos debe juzgar cual es el descriptor más importante de existir más de uno, y tratar de evitar los códigos 5.0 y 5.1. Acá se visibiliza la importancia de la capacitación del personal abocado a la tarea y comunión de criterios.



Nro.	Anotación	Descripción
1	Mantenimiento Preventivo	Avería descubierta durante el mantenimiento preventivo, reemplazo o rehabilitación de un aparato al momento de ejecutar el programa de mantenimiento preventivo
2	Pruebas funcionales	Avería descubierta al activar una función programada y comparar la respuesta con un estándar predefinido
3	Inspección	Avería descubierta durante una inspección planeada, por ej., inspección visual, prueba no destructiva
4	Monitoreo periódico de condición	Avería descubierta durante el monitoreo de condición planeado y programado de un modo predefinido de avería, ya sea manual como automáticamente, por ej., termografía, medición de vibraciones, muestreo
5	Monitoreo continuo de condición	Avería descubierta durante el monitoreo continuo de condición de un modo predefinido de averías
6	Mantenimiento correctivo	Avería descubierta durante mantenimiento correctivo
7	Observación	Observación durante inspección rutinaria o casual y no rutinaria realizada por el operador principal con los sentidos (olor, ruido, humo, fuga, apariencia, indicadores locales, etc.)
8	Combinación	Varios de los métodos arriba descriptos. Si uno es el predominante, debe ser codificado
9	Interferencia con la producción	Avería descubierta por interrupción, reducción, etc., en la producción
10	Otros	Otros métodos de observación

Tabla 6-13 Método de Detección según Norma ISO 14224



Nro.	Actividad	Descripción	Ejemplos	Uso ¹⁵
1	Reemplazar	Reemplazo del aparato por uno nuevo, o repotenciado, del mismo tipo y marca	Reemplazo de un cojinete desgastado	C, P
2	Reparar	Acción de mantenimiento manual realizada para restaurar un aparato a su apariencia y estado originales	Volver a empacar, soldar, taponar, reconectar, rehacer, etc.	C
3	Modificar	Reemplazar, renovar o cambiar el aparato, o parte de él, con un aparato/ parte de diferente tipo, marca, material o diseño.	Instalar un filtro con un diámetro de malla más pequeño, reemplazar una bomba para aceite lubricante por una bomba de otro tipo, etc.	C
4	Ajustar	Hacer que alguna condición que esta fuera de tolerancia se encuentre dentro del rango de tolerancia	Alinear, programar y reprogramar, calibrar, balancear, etc.	C
5	Reparar	Actividades de reparación/ servicios menores para mejorar la apariencia interna y externa de un aparato	Pulir, limpiar, esmerilar, pintar, revestir, lubricar, cambiar aceite, etc.	C
6	Verificar ¹⁶	La causa de una avería es investigada, pero no se realiza ninguna acción de mantenimiento, o se posterga la acción. Es posible que pueda funcionar nuevamente con acciones simples como, por ej., reiniciar o reprogramar	Reiniciar, reprogramar, etc., para averías funcionales, como, por ejemplo, en detectores de gas, incendio, humo.	C
7	Dar servicio	Tareas periódicas de servicio. Normalmente no es necesario desmantelar el aparato.	Por ej., limpieza, reabastecimiento de insumos, ajustes y calibraciones	P
8	Probar	Pruebas periódicas de la disponibilidad de funciones	Pruebas de funciones de la bomba de la red de incendio, detectores de gas, etc.	P
9	Inspeccionar	Inspecciones/ verificaciones periódicas. Cuidadoso escrutinio de un aparato con o sin desmantelamiento, normalmente con el uso de los sentidos	Todos los tipos de verificaciones generales. El mantenimiento general se incluye como parte de tareas de inspección	P

¹⁵ C: usado típicamente en mantenimiento correctivo; P: usado típicamente en mantenimiento preventivo.

¹⁶ Incluye aquellas circunstancias donde se reveló la causa, pero no se consideró necesario tomar una acción, y aquellas donde no se encontró una causa para la avería.



10	Acondicionamiento	Acondicionamiento integral	Inspección/ reacondicionamiento integral con desensamblaje y reemplazo de aparatos según se especifique o requiera	P(C)
11	Combinar	Se incluyen varias de las actividades arriba descriptas	Si una actividad es la que domina, esta podría ser registrada	C, P
12	Otros	Actividad de mantenimiento que no sea la especificada anteriormente		C, P

Tabla 6-14 Actividad de Mantenimiento según Norma ISO 14224

6.1.5 – Requerimientos de Datos para Análisis Cuantitativo de Riesgos

La recolección de la información debe considerarse cuidadosamente a fin de que el tipo de dato sea consistente con el propósito programado. La Norma reconoce cinco áreas principales de aplicación de los datos obtenidos a partir de la gestión propuesta. Para los fines del presente trabajo, se detalla la información necesaria para asegurar el correcto desempeño de los modelos de Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA), que son:

Requerimientos de Datos		QRA
Datos del Equipo	Identificación:	X
	- Ubicación	X
	- Clasificación	X
	- Info. De la Instalación	X
	Diseño:	X
	- Info. Del Fabricante	X
	- Características de diseño	X
	Aplicación:	X
	- Período de vigilancia	X
	- Tiempo operativo acumulado	X
	- Número de ordenes	X



	- Modo operativo	X
Datos de Averías	Aparato averiado:	X
	- Unidad de equipo	X
	- Sub-Unidad	X
	- Ítem Mantenible	X
	Modo de avería	X
	Clase de Severidad	X
	Descriptor de averías	
	Causa de la avería	X
	Método de observación	
	Impacto de la avería en la operación	X
Datos de Mantenimiento	Categoría de mantenimiento	X
	Actividad de mantenimiento	
	Tiempo de inactividad	
	Tiempo de mantenimiento activo	
	Recursos de mantenimiento:	
	- HH por disciplina	
	- HH Total	
Datos adicionales	Descripción de la avería y/o del evento de mantenimiento.	X



6.2 - Recolección de Datos

6.2.1 - Importancia de la recolección de datos

Como se detalló hasta aquí, datos de fallas de equipos pueden ser recolectados del proveedor, de bases de datos o del campo de trabajo. En cualquiera de los casos anteriores, es indispensable contar con un documento formal de reporte de falla, para asegurar la fiabilidad y consistencia de la información recolectada.

Los datos de fallas recolectados en el campo son más valiosos, por ser obtenidos bajo condiciones reales de trabajo. Como la recolección de datos depende del personal, está sujeto a errores, omisiones o malinterpretación. Es aquí donde se ve reflejada la importancia de usar un documento formal (reporte) para estandarizar el procedimiento de recolección de datos. El análisis de la información obtenida permite:

- ≡ Identificar errores de diseño y fabricación.
- ≡ Provee tendencias de confiabilidad.
- ≡ Confeccionar una base de datos que permitan predecir futuras fallas.
- ≡ Confeccionar programas de mantenimiento preventivo.

Un sistema estandarizado de reporte de fallas no debe ser genérico para cualquier instalación/equipamiento industrial. Se deben considerar cada proyecto de manera diferenciada, para poder confeccionar un registro de reporte que atienda a las necesidades y condiciones particulares de la instalación/equipamiento y su ambiente de trabajo.

Es también una buena práctica incluir al cliente, en caso de existir, en el sistema de recolección de datos, a fin de sumar más experiencias e información de gran valor.

6.2.2 – Dificultades

Los principales problemas asociados a la recolección y almacenamiento de datos de fallas son:

- ≡ Inventarios: Los reportes de fallas no suelen identificar la totalidad de los elementos de equipo involucrados, las fechas de instalación/comienzo de funcionamiento y las horas de trabajo acumuladas.



- ≡ Motivación de los empleados: El objetivo y la funcionalidad de la información recabada en los reportes debe ser explicada a los responsables de confeccionar los mismos. Si el responsable no se encuentra debidamente capacitado y motivado, el reporte de falla va a ser el primer paso en ser omitido o salteado. Para esto es importante publicar periódicamente metas alcanzadas y utilidad del trabajo realizado.
- ≡ Falta de verificación: rara vez los reportes de fallas son controlados una vez completos. Esto puede generar que se carguen datos erróneos o inexactos, por lo que se pierde representatividad y fiabilidad en las estadísticas.
- ≡ Costos: ya sea por el tiempo destinado a completar reportes de falla y el destinado a interpretar la información. Si la información cargada es correcta, es correctamente interpretada y se llevan a cabo las acciones necesarias para eliminarlas, entonces el costo se puede considerar nulo, o incluso negativo, por el ahorro que implica eliminar futuras fallas.
- ≡ Reportes erróneos: muchas veces sucede que se reportan fallas que no existieron. Esto puede ocurrir de dos maneras. Por un lado, ante una falla y la necesidad de reparar un equipo, se suelen reemplazar piezas que se sospecha han fallado, pero no se tiene la certeza de que esto haya sido así. Por otro lado, también existe la posibilidad de considerar una falla secundaria, como primaria. Es decir, la falla de un elemento genera stress en otro, provocando su falla. De esta manera se reportan fallas de manera errónea.

6.2.3 - Horas de trabajo

Es necesario, para poder interpretar correctamente la información de campo, implementar y mantener actualizado un inventario de activos, piezas y equipos, detallando fecha de instalación, colocación, recambio de cada uno de ellos. De esta manera, se puede determinar fácilmente, y de manera cierta y objetiva, los tiempos acumulados de trabajo. Esto suele ser un desafío difícil de superar, ya que no siempre se reporta esta información, es incompleta o poco precisa.



Consiguiendo determinar las horas de trabajo y el número de fallas de un equipo/pieza, información que se podrá recabar si se implementan procedimientos para reportar fallas de manera efectiva, se podrá calcular la tasa de fallas.

Para esto, es esencial que cada equipo/pieza del sistema en control, se encuentre debidamente identificado (generalmente por número o código de equipo/pieza) y cada falla, asociada a uno de ellos. Esto implica una descripción del modo de falla, del motivo mecánico/físico de la falla, más que del efecto que esta tuvo.

Si una pieza es reemplazada, eliminada o reparada, se lo debe reportar con el objetivo de poder comenzar a tomar tiempos de trabajo hasta próxima falla.

Para ejemplificar, suponemos una bomba de diafragma instalada hace 5 años en un circuito de bombeo de fluido. Hace 1 año se reemplazó el diafragma. En caso de ocurrir una falla del diafragma, el tiempo de trabajo hasta la falla es de 1 año. En caso de ocurrir una falla con algún otro elemento de la bomba, el tiempo de trabajo hasta la falla será de 5 años.

Resumiendo, la información que se debe reportar al momento de identificarse una falla/ realizar una modificación en un sistema es:

- ≡ Fecha de instalación (o reemplazo o reparo) y número de pieza/equipo/item mantenible.
- ≡ Fecha de falla y número de pieza/equipo.
- ≡ Tipo de falla (modo de avería).
- ≡ Causa de falla.
- ≡ Impacto de la falla en la operación.
- ≡ Relación horas de trabajo/día (para calcular las horas de trabajo efectivas hasta la falla).

Si esta información es correctamente incluida en los reportes de fallas, entonces será posible identificar:

- ≡ Tiempos de trabajo del elemento hasta la falla.
- ≡ Tiempos de trabajo de piezas/equipos que no fallaron.
- ≡ Tiempos de trabajo de piezas/equipos que fueron reemplazados sin fallar.



6.2.4 – Planillas y Bases de datos

Generalmente, los reportes de fallas se confeccionan en el campo, al momento de detectarse la falla y/o repararse. Luego, son ingresadas a una base de datos. Para facilitar esta tarea, es recomendable que la información esté codificada. El responsable de completar el reporte debe disponer de una base de datos codificada, de manera de completar el formulario con dicha codificación (preferentemente alfanumérica).

A modo de ejemplo, un reporte de falla podría quedar codificado de la siguiente manera:

- ≡ Código de pieza/equipo: RC1-66-03-5555, donde:
 - R: Letra de identificación para la planta que la empresa tiene en Rosario.
 - C1: Sistema de Compresores.
 - 66: Subsistema de Generación de Energía (Unidad)
 - 03: Sistema eléctrico (Sub-Unidad).
 - 5555: Pieza que falla/ítem mantenible

- ≡ Modo de hallazgo de falla (no es estrictamente necesario para QRA):
 - 01: Mantenimiento preventivo.
 - 02: Pruebas funcionales
 - 03: Inspección.
 - 04: Monitoreos periódicos de condición.
 - 05: Monitoreo continuo de condición.
 - 06: Mantenimiento correctivo.
 - 07: Observación.
 - 08: Combinación (especificar entre paréntesis)
 - 09: Interferencia con la producción.
 - 10: Otros (especificar)

- ≡ Tipo de falla:
 - 10: Mecánica - General
 - 11: Fuga
 - 12: Vibración
 - 13: Alineamiento
 - 14: Deformación
 - 15: Aflojamiento
 - 16: Atascamiento
 - 20: Materiales – General
 - 21: Cavitación
 - 22: Corrosión
 - 23: Erosión
 - 24: Desgaste



- 25: Ruptura
- 26: Fatiga
- 27: Sobrecalentamiento
- 28: Estallido
- 30: Instrumento – General
- 31: Falla por control
- 32: Sin señal/indicación/alarma
- 33: Señal/indicación/alarma defectuosa
- 34: Desajuste
- 35: Falla de software
- 36: Falla en modo normal
- 40: Eléctrica – General
- 41: Cortocircuito
- 42: Circuito abierto
- 43: Sin energía/voltaje
- 44: Energía/voltaje defectuoso
- 45: Falla en conexión a tierra/aislamiento
- 50: Externa - General
- 51: Bloqueo/atascamiento
- 52: Contaminación
- 53: Externas varias (explicitar)
- 60: Varios - General
- 61: Desconocido

≡ Acciones correctivas tomadas:

- 01: Pieza reemplazada.
- 02: Pieza reparada.
- 03: Pieza modificada
- 04: Pieza ajustada
- 05: Reparó menor
- 06: Verificado
- 07: Servicio
- 08: Probar
- 09: Inspeccionar
- 10: Acondicionamiento integral
- 11: Combinación (especificar)
- 12: Otro

≡ Área de mantenimiento involucrada:

- 01: Eléctricos.
- 02: Mecánicos.
- 03: Refrigeración.

Se debería, además, dejar espacio para observaciones propias del personal que realiza el reporte, donde se puede asentar información útil sobre el tema. (Smith, 2001)



6.2.5 – Recomendaciones

La información recabada del campo (reporte de fallas) es información de vital importancia, ya que refleja el comportamiento del sistema en sus condiciones reales de trabajo. Como se dijo anteriormente, los reportes completados de manera errónea o deficiente no presentan la información necesaria para identificar las fallas y determinar la tasa de falla. Es por esto por lo que el sistema de reporte y database debe contener:

- ≡ Información adecuada acerca de los síntomas y causas de la falla. Es importante ya que la predicción es útil cuando el concepto de falla del sistema está bien definido. Por lo tanto, las fallas de los componentes que contribuyen a la falla del sistema solo se pueden identificar si los registros son precisos. Es necesario, entonces, saber diferenciar el concepto de falla (perdida de funcionamiento) de defecto (degradación del funcionamiento).
- ≡ Inventario detallado y actualizado de sistemas, equipos y piezas, que permita identificar cada componente individualmente. Esencial para el control de horas de trabajo y para calcular falla de tiempo constante.
- ≡ Identificación de fallas frecuentes, revisando equipos iguales en búsqueda de la ocurrencia de la misma falla en más de uno o todas las unidades. Para esto es necesario identificar cuando dos o más fallas se dan por un ítem específico en diferentes equipos. Es fundamental que las fallas reportadas identifiquen el ítem involucrado de manera específica.
- ≡ Intervalos de tiempo entre fallas frecuentes. No siempre este intervalo es igual.
- ≡ El efecto que la falla de un componente de un sistema tiene sobre el sistema. Esto varía de acuerdo con el sistema.
- ≡ Consecuencias o posibles consecuencias en cuestiones de seguridad (lesiones, muertes, pérdidas materiales y/o daño al medio ambiente). Este punto no es fácilmente cuantificable. O al menos no lo es de manera objetiva.
- ≡ Consideraciones acerca de si la falla se debe a cuestiones intrínsecas del sistema o ítem, o si se debió a factores externos, como pueden ser:
 - Falla humana del operador del sistema.
 - Falla en tareas de mantenimiento.



- Falla por modificaciones en el sistema.
- ≡ Recursos para revisar reportes de fallas y corregir errores a fin de garantizar consistencia en la información suministrada. Básicamente se requieren de horas-hombre que analicen los reportes levantados. Ciertos autores (Smith, 2001) estiman la necesidad de destinar 1 hora para revisar el reporte, investigar la naturaleza de una falla dada y para discutir y establecer la causa raíz.
- ≡ Información sobre el ambiente de trabajo y operaciones de trabajo del sistema.

6.2.6 – Análisis de la información recolectada

Una vez recolectada la información en el campo, esta debe ser analizada. Las conjeturas tomadas a partir de este análisis deben traducirse en acciones para abordar los problemas identificados, o todo el sistema pierde consistencia y utilidad.

La manera más apropiada de comenzar con el análisis es a partir de un diagrama de Pareto, para identificar y hacer foco en las fallas más significativas. Esta herramienta consiste en graficar la frecuencia de cada tipo de falla, ordenada de manera decreciente. Se podrá observar que el mayor porcentaje de fallas reportado se deben a un pequeño número de tipos de fallas (Ilustración 6-14 Diagrama de Pareto). De hecho, si el costo de acciones correctivas de cada tipo de falla se encuentra disponible, se puede multiplicar por la frecuencia de ocurrencia y re-ranquearlo en orden descendiente de costos. Así se identifican aquellos tipos de fallas más costosas y se da un orden de prioridad a la gestión de estas. Como en la mayoría de las organizaciones los recursos son escasos, mediante esta herramienta se asegura direccionar

los esfuerzos hacia aquellas fallas que representan mayor impacto en el desarrollo de las actividades de la organización.

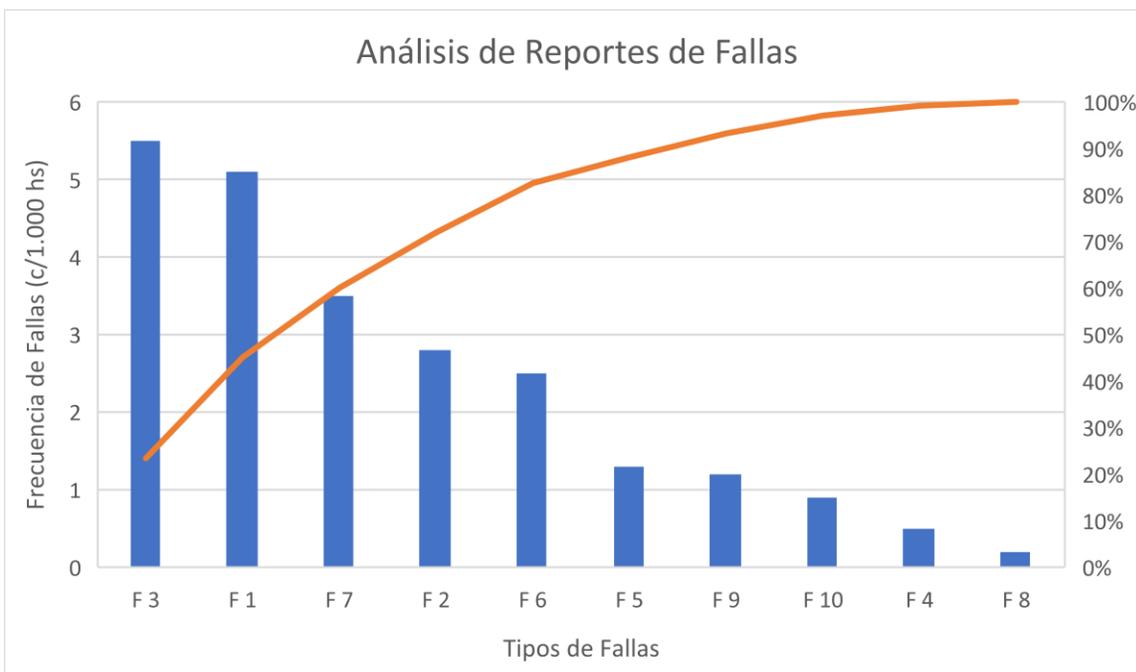


Ilustración 6-14 Diagrama de Pareto de Frecuencia de Falla

Es, además, útil saber si la frecuencia de un tipo puntual de falla está creciendo, decreciendo o se mantiene constante. Esto va a condicionar la respuesta en cuestiones de mantenimiento e ingeniería. El decrecimiento de la frecuencia refleja la necesidad de tomar acciones para eliminar las fallas prematuras o de inicio de actividad. El crecimiento de la frecuencia muestra la necesidad de rediseñar el sistema o de mejorar el mantenimiento preventivo del mismo. Mantener una frecuencia constante sugiere una confiabilidad inherente al sistema.

A continuación, se muestra un formato recomendado para reportar fallas. En él se detallan los datos más importantes de asentar, siempre considerando el enfoque QRA.



	Reporte de Falla	Rev.:
		Nro. Reporte:
Código de pieza/equipo de falla: _____		
Fecha del incidente/falla: ___ / ___ / ___ Hora del incidente/falla: ____:____ hs.		
Fecha de instalación/reemplazo/reparo de pieza/equipo: ___ / ___ / ___		
Operador de Mantenimiento: _____		
Área de mantenimiento involucrada: _____		
Descripción del ítem que presenta la falla: _____ _____		
Tipo de falla: _____		
Motivo de la falla: _____ _____		
Tiempo fuera de uso: ____ hs. Tiempo reparo: ____ hs. Tiempo trabajo hasta falla: ____ hs.		
Acción correctiva tomada: _____		
Piezas/Repuestos utilizados: _____		
Modo de hallazgo de falla: _____		
Efecto en el sistema/operación: _____ _____		
¿Falla frecuente?: Si / No		
En caso afirmativo, Causa: _____ _____		
Descripción del ambiente/condición operativa: _____ _____		
Observaciones: _____ _____		



7 – Conclusiones

Durante el desarrollo del presente trabajo se expusieron los conceptos matemáticos relacionados con las funciones de confiabilidad y su aplicación práctica. Se dedujeron las expresiones matemáticas para el modelamiento de la tasa de fallas aplicada a componentes que han sido sometidos a pruebas de duración. Se describieron las principales características de los Manuales de Datos de Fallas disponibles para consulta, las limitaciones de sus predicciones y el manejo de la información. Se desarrollaron las bases para la implementación y mantenimiento de sistemas propios de bases de datos de fallas, su morfología y estructuras. Por último, el presente trabajo definió también los diferentes aspectos a considerar durante la recolección y tabulación de los datos de fallas para garantizar un efectivo análisis estadístico que permita hacer un pronóstico acertado sobre el comportamiento de un sistema. El éxito que se pueda obtener va a depender de la calidad de los datos obtenidos.

Son muchos los esfuerzos individuales que se hacen para analizar un mismo tipo de equipos, sus mecanismos de fallas, sus fallas posibles, normalmente dispersos y aislados. Es por eso por lo que la implementación de sistemas de bases de datos estandarizados es una herramienta fundamental para obtener logros sólidos. Además, la divulgación de estos facilitará la coparticipación entre organizaciones, lo que permitirá obtener resultados de forma más acelerada. Esto es una ventaja no solo para el campo del Análisis Cuantitativo de Riesgos, sino también para el área de Ingeniería de Mantenimiento y Mantenimiento Basado en Confiabilidad. La seguridad hacia los empleados también se incrementa ya que, implementando un Sistema de Gestión de Datos de Fallas y basándose en los resultados para desarrollar un Programa de Mantenimiento, es menos probable que se presenten fallas que puedan generar accidentes como explosiones o fugas peligrosas.

El definir como paso inicial recopilar y analizar la información de la instalación y sus activos, resalta la importancia de que, quien lleve adelante el análisis QRA, conozca bien las instalaciones antes de continuar con la siguiente etapa.

La implementación de un Sistema de Gestión de Datos de Fallas debe comprometerse y centrarse en el exclusivo beneficio del Hombre y su medio, posibilitando ambientes con riesgos cada vez menores.



Anexo I – Distribución de Pearson

En estadística, la distribución de Pearson, llamada también chi cuadrado (χ^2) es una distribución de probabilidad continua con un parámetro k que representa los grados de libertad de la variable aleatoria

$$X = Z_1^2 + Z_2^2 + \dots + Z_k^2$$

Donde Z_i son variables aleatorias normales independientes de media cero y varianza uno. El que la variable aleatoria X tenga esta distribución se representa habitualmente de la manera

$$X \sim \chi_k^2.$$



g.d.l.	χ^2																g.d.l.
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40		
1	10,828	7,879	6,635	5,412	5,024	4,709	4,218	3,841	2,706	2,072	1,642	1,323	1,074	0,873	0,708		
2	13,816	10,597	9,210	7,824	7,378	7,013	6,438	5,991	4,605	3,794	3,219	2,773	2,408	2,100	1,833		
3	16,266	12,838	11,345	9,837	9,348	8,947	8,311	7,815	6,251	5,317	4,642	4,108	3,665	3,283	2,946		
4	18,467	14,860	13,277	11,668	11,143	10,712	10,026	9,488	7,779	6,745	5,989	5,385	4,878	4,438	4,045		
5	20,515	16,750	15,086	13,388	12,833	12,375	11,644	11,070	9,236	8,115	7,289	6,626	6,064	5,573	5,132		
6	22,458	18,548	16,812	15,033	14,449	13,968	13,198	12,592	10,645	9,446	8,558	7,841	7,231	6,695	6,211		
7	24,322	20,278	18,475	16,622	16,013	15,509	14,703	14,067	12,017	10,748	9,803	9,037	8,383	7,806	7,283		
8	26,124	21,955	20,090	18,168	17,535	17,010	16,171	15,507	13,362	12,027	11,030	10,219	9,524	8,909	8,351		
9	27,877	23,589	21,666	19,679	19,023	18,480	17,608	16,919	14,684	13,288	12,242	11,389	10,656	10,006	9,414		
10	29,588	25,188	23,209	21,161	20,483	19,922	19,021	18,307	15,987	14,534	13,442	12,549	11,781	11,097	10,473		
11	31,264	26,757	24,725	22,618	21,920	21,342	20,412	19,675	17,275	15,767	14,631	13,701	12,899	12,184	11,530		
12	32,909	28,300	26,217	24,054	23,337	22,742	21,785	21,026	18,549	16,989	15,812	14,845	14,011	13,266	12,584		
13	34,528	29,819	27,688	25,472	24,736	24,125	23,142	22,362	19,812	18,202	16,985	15,984	15,119	14,345	13,636		
14	36,123	31,319	29,141	26,873	26,119	25,493	24,485	23,685	21,064	19,406	18,151	17,117	16,222	15,421	14,685		
15	37,697	32,801	30,578	28,259	27,488	26,848	25,816	24,996	22,307	20,603	19,311	18,245	17,322	16,494	15,733		
16	39,252	34,267	32,000	29,633	28,845	28,191	27,136	26,296	23,542	21,793	20,465	19,369	18,418	17,565	16,780		
17	40,790	35,718	33,409	30,995	30,191	29,523	28,445	27,587	24,769	22,977	21,615	20,489	19,511	18,633	17,824		
18	42,312	37,156	34,805	32,346	31,526	30,845	29,745	28,869	25,989	24,155	22,760	21,605	20,601	19,699	18,868		
19	43,820	38,582	36,191	33,687	32,852	32,158	31,037	30,144	27,204	25,329	23,900	22,718	21,689	20,764	19,910		
20	45,315	39,997	37,566	35,020	34,170	33,462	32,321	31,410	28,412	26,498	25,038	23,828	22,775	21,826	20,951		
21	46,797	41,401	38,932	36,343	35,479	34,759	33,597	32,671	29,615	27,662	26,171	24,935	23,858	22,888	21,991		
22	48,268	42,796	40,289	37,659	36,781	36,049	34,867	33,924	30,813	28,822	27,301	26,039	24,939	23,947	23,031		
23	49,728	44,181	41,638	38,968	38,076	37,332	36,131	35,172	32,007	29,979	28,429	27,141	26,018	25,006	24,069		
24	51,179	45,559	42,980	40,270	39,364	38,609	37,389	36,415	33,196	31,132	29,553	28,241	27,096	26,063	25,106		
25	52,620	46,928	44,314	41,566	40,646	39,880	38,642	37,652	34,382	32,282	30,675	29,339	28,172	27,118	26,143		
26	54,052	48,290	45,642	42,856	41,923	41,146	39,889	38,885	35,563	33,429	31,795	30,435	29,246	28,173	27,179		
27	55,476	49,645	46,963	44,140	43,195	42,407	41,132	40,113	36,741	34,574	32,912	31,528	30,319	29,227	28,214		
28	56,892	50,993	48,278	45,419	44,461	43,662	42,370	41,337	37,916	35,715	34,027	32,620	31,391	30,279	29,249		
29	58,303	52,336	49,588	46,693	45,722	44,913	43,604	42,557	39,087	36,854	35,139	33,711	32,461	31,331	30,283		
30	59,703	53,672	50,892	47,962	46,979	46,160	44,834	43,773	40,256	37,990	36,250	34,800	33,530	32,382	31,316		
31	61,098	55,003	52,191	49,226	48,232	47,402	46,059	44,985	41,422	39,124	37,359	35,887	34,598	33,431	32,349		
32	62,487	56,328	53,486	50,487	49,480	48,641	47,282	46,194	42,585	40,256	38,466	36,973	35,665	34,480	33,381		
33	63,870	57,648	54,776	51,743	50,725	49,876	48,500	47,400	43,745	41,386	39,572	38,058	36,731	35,529	34,413		
34	65,247	58,964	56,061	52,995	51,966	51,107	49,716	48,602	44,903	42,514	40,676	39,141	37,795	36,576	35,444		
35	66,619	60,275	57,342	54,244	53,203	52,335	50,928	49,802	46,059	43,640	41,778	40,223	38,859	37,623	36,475		
40	73,402	66,766	63,691	60,436	59,342	58,242	56,946	55,758	51,805	49,244	47,269	45,616	44,165	42,848	41,622		
60	99,007	91,952	88,379	84,580	83,298	82,025	80,482	79,341	74,397	71,341	68,972	66,981	65,227	63,628	62,135		
80	124,839	116,321	112,329	108,069	106,629	105,422	103,459	101,879	96,578	93,106	90,405	88,130	86,120	84,284	82,566		
90	137,208	128,269	124,116	119,648	118,136	116,869	114,806	113,145	107,565	103,904	101,054	98,650	96,524	94,581	92,761		
100	149,449	140,169	135,807	131,142	129,561	128,237	126,079	124,342	118,498	114,659	111,667	109,141	106,906	104,862	102,946		
120	173,617	163,648	158,950	153,918	152,211	150,780	148,447	146,567	140,233	136,062	132,806	130,055	127,616	125,383	123,289		
140	197,451	186,847	181,840	176,471	174,648	173,118	170,624	168,613	161,827	157,352	153,854	150,894	148,269	145,863	143,604		

17 Fuente: Cátedra Probabilidad y Estadística – UTN FRRO



g.d.l	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,975	0,98	0,99	0,995	g.d.l
1	0,571	0,455	0,357	0,275	0,206	0,148	0,102	0,064	0,036	0,016	0,004	0,001	0,001	0,000	0,000	1
2	1,597	1,386	1,196	1,022	0,862	0,713	0,575	0,446	0,325	0,211	0,103	0,051	0,040	0,020	0,010	2
3	2,643	2,366	2,109	1,869	1,642	1,424	1,213	1,005	0,798	0,584	0,352	0,185	0,155	0,072	0,027	3
4	3,687	3,357	3,047	2,753	2,470	2,195	1,923	1,649	1,366	1,064	0,711	0,484	0,429	0,207	0,072	4
5	4,728	4,351	3,996	3,655	3,325	3,000	2,675	2,343	1,994	1,610	1,145	0,831	0,752	0,412	0,145	5
6	5,765	5,348	4,952	4,570	4,197	3,828	3,455	3,070	2,661	2,204	1,635	1,237	1,134	0,872	0,676	6
7	6,800	6,346	5,913	5,493	5,082	4,671	4,255	3,822	3,358	2,833	2,167	1,690	1,564	1,239	0,989	7
8	7,833	7,344	6,877	6,423	5,975	5,527	5,071	4,594	4,078	3,490	2,733	2,180	2,032	1,646	1,344	8
9	8,863	8,343	7,843	7,357	6,876	6,393	5,899	5,380	4,817	4,168	3,325	2,700	2,532	2,088	1,735	9
10	9,892	9,342	8,812	8,295	7,783	7,267	6,737	6,179	5,570	4,865	3,940	3,247	3,059	2,558	2,156	10
11	10,920	10,341	9,783	9,237	8,695	8,148	7,584	6,989	6,336	5,578	4,575	3,816	3,609	3,053	2,603	11
12	11,946	11,340	10,755	10,182	9,612	9,034	8,438	7,807	7,114	6,304	5,226	4,404	4,178	3,571	3,074	12
13	12,972	12,340	11,729	11,129	10,532	9,926	9,299	8,634	7,901	7,042	5,892	5,009	4,765	4,107	3,565	13
14	13,996	13,339	12,703	12,078	11,455	10,821	10,165	9,467	8,696	7,790	6,571	5,629	5,368	4,660	4,075	14
15	15,020	14,339	13,679	13,030	12,381	11,721	11,037	10,307	9,499	8,547	7,261	6,229	5,985	5,229	4,601	15
16	16,042	15,338	14,655	13,983	13,310	12,624	11,912	11,152	10,309	9,312	7,962	6,908	6,614	5,812	5,142	16
17	17,065	16,338	15,633	14,937	14,241	13,531	12,792	12,002	11,125	10,085	8,672	7,255	6,908	6,408	5,697	17
18	18,086	17,338	16,611	15,893	15,174	14,440	13,675	12,857	11,946	10,865	9,390	8,231	7,906	7,015	6,265	18
19	19,107	18,338	17,589	16,850	16,109	15,352	14,562	13,716	12,773	11,651	10,117	8,907	8,567	7,633	6,844	19
20	20,127	19,337	18,569	17,809	17,046	16,266	15,452	14,578	13,604	12,443	10,851	9,591	9,237	8,260	7,434	20
21	21,147	20,337	19,548	18,768	17,984	17,182	16,344	15,445	14,439	13,240	11,591	10,283	9,915	8,897	8,034	21
22	22,166	21,337	20,529	19,729	18,924	18,101	17,240	16,314	15,279	14,041	12,338	10,982	10,600	9,542	8,643	22
23	23,185	22,337	21,510	20,690	19,866	19,021	18,137	17,187	16,122	14,848	13,091	11,689	11,293	10,196	9,260	23
24	24,204	23,337	22,491	21,652	20,808	19,943	19,037	18,062	16,969	15,659	13,848	12,401	11,992	10,856	9,886	24
25	25,222	24,337	23,472	22,616	21,752	20,867	19,939	18,940	17,818	16,473	14,611	13,120	12,697	11,524	10,520	25
26	26,240	25,336	24,454	23,579	22,697	21,792	20,843	19,820	18,671	17,292	15,379	13,844	13,409	12,198	11,160	26
27	27,257	26,336	25,437	24,544	23,644	22,719	21,749	20,703	19,527	18,114	16,151	14,573	14,125	12,879	11,808	27
28	28,274	27,336	26,419	25,509	24,591	23,647	22,657	21,588	20,386	18,939	16,928	15,308	14,847	13,565	12,461	28
29	29,291	28,336	27,402	26,475	25,539	24,577	23,567	22,475	21,247	19,768	17,708	16,047	15,574	14,256	13,121	29
30	30,307	29,336	28,386	27,442	26,488	25,508	24,478	23,364	22,110	20,599	18,493	16,791	16,306	14,953	13,787	30
31	31,323	30,336	29,369	28,409	27,438	26,440	25,390	24,255	22,976	21,434	19,281	17,539	17,042	15,655	14,458	31
32	32,339	31,336	30,353	29,376	28,389	27,373	26,304	25,148	23,844	22,271	20,072	18,291	17,783	16,362	15,134	32
33	33,355	32,336	31,337	30,344	29,340	28,307	27,219	26,042	24,714	23,110	20,867	19,047	18,527	17,074	15,815	33
34	34,371	33,336	32,322	31,313	30,293	29,242	28,136	26,938	25,586	23,952	21,664	19,806	19,275	17,789	16,501	34
35	35,386	34,336	33,306	32,282	31,246	30,178	29,054	27,836	26,460	24,797	22,465	20,569	20,027	18,509	17,192	35
40	40,459	39,335	38,233	37,134	36,021	34,872	33,660	32,345	30,856	29,051	26,509	24,433	23,838	22,164	20,707	40
60	60,713	59,335	57,978	56,620	55,239	53,809	52,294	50,641	48,759	46,459	43,188	40,482	39,699	37,485	35,534	60
80	80,927	79,334	77,763	76,188	74,583	72,915	71,145	69,207	66,994	64,278	60,391	57,153	56,213	53,540	51,172	80
90	91,023	89,334	87,666	85,993	84,285	82,511	80,625	78,558	76,195	73,291	69,126	65,647	64,635	61,754	59,196	90
100	101,115	99,334	97,574	95,808	94,005	92,129	90,133	87,945	85,441	82,358	77,929	74,222	73,142	70,065	67,328	100
120	121,285	119,334	117,404	115,465	113,483	111,419	109,220	106,806	104,037	100,624	95,705	91,577	90,367	86,923	83,852	120
140	141,441	139,334	137,248	135,149	133,003	130,766	128,380	125,758	122,748	119,029	113,659	109,137	107,815	104,034	100,655	140

18

18 Fuente: Cátedra Probabilidad y Estadística – UTN FRRO

Bibliografía

BBC News. (06 de Julio de 2005). *BBC News - United Kingdom*. Obtenido de BBC News at Home - On this Day: http://news.bbc.co.uk/onthisday/hi/dates/stories/july/6/newsid_3017000/3017294.stm

Blakemore, E. (2019). El desastre de Chernobil: que ocurrió y cuales son sus defectos a largo plazo. *National Geographic*.

Ecologistas en Acción. (07 de Julio de 2016). *ONG - Ecologistas en acción*. Obtenido de <https://www.ecologistasenaccion.org>

EPA - Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (17 de Abril de 2017). *EPA Official Site*. Obtenido de <https://www.epa.gov/enforcement/deepwater-horizon-bp-gulf-mexico-oil-spill>

Foro de la Industria Nuclear Española. (04 de Julio de 2018). *Foro Nuclear*. Obtenido de <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-proteccion-radiologica-y-radiacion/chernobil-como-fue-el-accidente/>

Hyatt, N. (2004). *Guidelines for Process Hazards Analysis, Hazards Identification & Risk Analysis*. Ontario, Canada: Dyadem Press.

Miranda, E. (07 de Junio de 2019). Chernobyl: Que pasó y como sucedió el accidente. (L. Zulián, Entrevistador)

National Commission on the BP Deepwater Horizon. (2011). *Deep Water - The Gulf Oil Disaster and the Future*. GPO.

Norma ISO 14224 - Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. (s.f.).

OREDA. (2015). *Offshore and Onshore Reliability Data*. NTNU.

Pallardy, R. (13 de Abril de 2020). *Derrame de petróleo de Deepwater Horizon - DESASTRE AMBIENTAL, GOLFO DE MÉXICO*. Obtenido de ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA: <https://www.britannica.com/event/Deepwater-Horizon-oil-spill>



Planas, O. (15 de Marzo de 2011). *Energía Nuclear*. Obtenido de <https://energia-nuclear.net/accidentes-nucleares/fukushima>

Red Proteger. (04 de Agosto de 2012). *Red Proteger*. Obtenido de Red Proteger - Escuela de Seguridad:
https://www.redproteger.com.ar/escueladeseguridad/grandesaccidentes/bhopal_1984.htm

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). *Introducción al Análisis de Riesgo Ambiental*. Mexico D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

Smith, D. D. (2001). *Reliability, Maintainability and Risk*. Oxford: Butterworth-Heubennann.

Troffe, M. (2009). Análisis ISO 14224 / OREDA. *Petrotecnia*, 12.

Way Back Machine. (13 de Septiembre de 2013). Obtenido de Way Back Machine - Internet Archive:
<https://web.archive.org/web/20130908224432/http://library.thinkquest.org/10867/home.shtml>

Zapata, J. M. (2011). *Manual de Datos OREDA*. Medellín: Universidad EAFIT.