

INGENIERÍA DE RESILIENCIA, LA NUEVA TENDENCIA TECNOLÓGICA MUNDIAL

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2019.

Fecha de aceptación: 28 de febrero de 2020.

TCL. Héctor Reyes Campaña¹
Srta. Vania Palacios Sandoval²

Resumen: esta publicación propone una aproximación para los oficiales, ingenieros politécnicos militares (IPM) y personal militar interesado en ciencia y tecnología, a los conceptos introductorios de la ingeniería de resiliencia. Además, exponer los estudios en que diferentes autores e instituciones se han interesado sobre este tema, para así potenciar esta corriente tecnológica como parte de la ingeniería del mantenimiento. Se explica en primera instancia los conceptos de mantenibilidad, confiabilidad, disponibilidad y riesgos, a objeto de generar la base conceptual de la resiliencia con el foco al mantenimiento de los activos de defensa.

Palabras clave: ingeniería, resiliencia, mantenimiento, confiabilidad, disponibilidad, riesgos.

Abstract: this publication proposes an approach to the concepts of resilience engineering for officers polytechnic military engineers (IPM) and military personnel interested in science and technology. In addition to expose the studies in which different authors and institutions have been interested in this topic, in order to enhance this technological current as part of maintenance engineering. The concepts of maintainability, reliability, availability and risk are explained in the first instance, with the objective of generate the conceptual basis of resilience with the focus on the maintenance of defense assets.

Keywords: engineering, resilience, maintenance, reliability, availability, risk.

-
- 1 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas mención Mecánica, de la Academia Politécnica Militar del Ejército de Chile. Diplomado en Estadística mención Minería de Datos de la Universidad de Santiago de Chile. Magister en Gestión de Activos y Mantenimiento de la Universidad Técnica Federico Santa María. Doctor en Ingeniería de la Universidad de Nottingham, Reino Unido. Jefe del Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo (DI2D) de la División de Mantenimiento (DIVMAN), Ejército de Chile. Santiago, Chile. Email: hector.reyes@ejercito.cl
 - 2 Estudiante de pregrado de Ingeniería de Ejecución en Mecánica del Departamento de Ingeniería Mecánica (DIMEC) de la Universidad de Santiago de Chile (USACH). Santiago, Chile. Email: vania.palacios.s@usach.cl



1. INTRODUCCIÓN

Cuando un activo de defensa presenta una falla funcional, esta puede ser causada, entre otras cosas, por procedimientos inadecuados, degradación del activo, sistemas mal utilizados, errores humanos e incluso producidos por el medioambiente en el cual se encuentra desarrollando acciones el sistema. Es necesario indicar que existen factores involucrados que son detectables antes de que la falla se genere, lo que implica que la falla puede ser prevenida, incluso si el sistema en estudio se encuentra inmerso en un proceso de inestabilidad o estabilidad dinámica.

En general, los activos físicos se encuentran diseñados en base a una vida útil programada, por lo que no es factible pensar que estos puedan conservar para siempre las características básicas que les permitan mantener vigente la función para la que fueron diseñados o mejorarlas, sin ser sometidos previamente a un upgrade o a un overhaul. La probabilidad que un sistema falle siempre está presente y en ingeniería, este evento técnico es definido como *“una consecuencia de la falta de robustez o presencia de errores”* (Yang, 2007). En general las fallas que afectan a sistemas complejos, sistemas de armas, activos de defensa o procesos productivos (ya sean discretos o continuos) son consideradas como un percance, retraso o evento de carácter negativo, ya que esto implica que se deja de realizar la función y que resta al desarrollo de las actividades planificadas, junto con afectar el desempeño de algunas tareas propias de Ejército de Chile (entrenamiento, emergencia, soporte en estados de emergencia, catástrofes, etc.).

Si bien las fallas se pueden catalogar según su magnitud como parciales o totales; y según las causas, como primarias, secundarias o múltiples y dependiendo del nivel de consecuencias que podrían llegar a ser como catastrófica, crítica o leve, en muchos casos las fallas catastróficas resultan con consecuencias fatales. Teniendo en cuenta esta idea, genera la necesidad del estudio de Ingeniería de mantenimiento ya que quienes estudian este campo de la ingeniería investigan la forma de mejorar el desempeño de los sistemas de ingeniería buscando respuestas a preguntas ¿por qué? y ¿cómo ocurren las fallas? (Ajit Kumar Verma, 2015).

El estudio de la ingeniería de mantenimiento envuelve conceptos como confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y un concepto técnico actualizado, denominado como *“Ingeniería de Resiliencia”*. Para abordar estos conceptos se debe recurrir a la historia donde surgió la necesidad del estudio.

Después de la Primera Guerra Mundial, la confiabilidad se convirtió en un tema de gran interés para la industria aérea, esto producto de fallas que existían en las aeronaves utilizadas en combate y que eran registradas por medio de informes estadísticos



que daban cuenta de diversos componentes pertenecientes a la aeronave habían fallado (Verma, 2015). Producto de la Segunda Guerra Mundial nació la necesidad de cuantificar la confiabilidad después de una serie de pruebas realizadas a los misiles V1 los que presentaban resultados relacionados con la baja confiabilidad basado en suposiciones que implicaban al eslabón más débil del sistema (el que desencadenaba una serie de fallas). Sin embargo, el alemán Robert Lusser (19 abril 1899-19 enero 1969) (Astronautix, 2020), un matemático de profesión, cuestionó la suposición original de que la confiabilidad de una cadena de componentes fuese determinada por su eslabón más débil y mostró que una gran cantidad de enlaces pueden ser menos confiable que solo un enlace débil debido a la inestabilidad y a la variabilidad de la fuerza de los componentes, por lo que propuso aplicar seguridad para aumentar la confiabilidad de todos los componentes, lo que resultó en una mejora importante dentro de la confiabilidad del misil V1 y que con el pasar de los años generó un interés de países como Alemania, EE.UU. y Reino Unido en desarrollar el estudio de confiabilidad. (Andrews and Moss, 2002).

El interés que presentaron los países desarrollados por el estudio del mantenimiento, confiabilidad y riesgos llevó a un desarrollo de diferentes modelos matemáticos que permitieran explicar de manera cuantitativa las fallas, introduciendo así métodos matemáticos en procesos industriales con la finalidad de mejorar la seguridad y disponibilidad (Andrews and Moss, 2002). Estos temas técnicos son de gran importancia para el Ejército de Chile ya que implican un aporte directo para el desarrollo tecnológico de las organizaciones como la División de Mantenimiento (DIVMAN), que otorga apoyo a la conservación de la flota militar de defensa cumpliendo tareas fundamentales como planificar las actividades y recursos asociados a la ejecución del mantenimiento, dirigir y controlar las actividades y recursos asociados al mantenimiento, asesorar de manera correcta en aspectos técnicos a las unidades que integran el Escalón Superior del Sistema de Mantenimiento. Junto con esto, la necesidad de contar con nuevos métodos técnicos permitió la creación del Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo (DI2D) que proyecta las futuras necesidades del Ejército en el ámbito de la ingeniería de mantenimiento y resiliencia.

A medida que avanzamos en el tiempo el progreso apunta en todas direcciones, pero con un foco principal a los desarrollos tecnológicos como aquellos que hacen mejorar la productividad o que resultan ser eficientes frente a emergencias y catástrofes, considerando los fuertes efectos del cambio climático, así como también existe la necesidad de indagar en temas de medicina y el bienestar humano del personal militar.

Es por ello por lo que investigar sobre tecnologías y métodos que lleven a una solución de problemas con mayor rapidez, implica el estudio de otros factores como el



riesgo y la ingeniería de resiliencia, tema que será abordado y presentado como una nueva corriente de ingeniería que investiga las fallas y eventos perturbadores de una manera sistémica.

2. DESARROLLO

Para desarrollar las bases del concepto de ingeniería de resiliencia, primero es necesario comprender los diversos estudios previos que existen relacionados con teorías que presentan las bases técnicas y fundaciones del estudio de la ingeniería de mantenimiento.

2.1. Riesgos

En el uso de cualquier sistema de armas o activo de defensa, el riesgo siempre está presente y puede ser minimizado, sin embargo, no puede eliminarse por completo. El riesgo puede definirse de manera cuantitativa como *“el producto de las consecuencias de un determinado accidente y la probabilidad durante un período de tiempo o frecuencia de su ocurrencia”* (Andrews and Moss, 2002, p. 9).

La expresión matemática, es presentada en la ecuación (1), como sigue:

$$R = C \times P \quad (1)$$

Donde:

R: riesgo

C: consecuencias

P: frecuencia de ocurrencia

La frecuencia de ocurrencia puede ser medida en horas, semanas, meses, años, mientras que las consecuencias se miden por lo que genera esta al ocurrir, por ejemplo, la consecuencia de que no se realice una inspección a los frenos de un vehículo es que estos fallen y se genere un choque automovilístico.

Es necesario entender que una manera de explicar cómo funciona el modelo cuantitativo de riesgos es por medio de ejemplos simples y cotidianos, para el caso de una ampolleta en un hogar la frecuencia del cambio de esta es relativamente alta, sin embargo, la consecuencia no es grave por lo que implica que el riesgo es bajo, pero ocurre lo contrario con la reparación o cambio de los álabes en mal estado de un motor a reacción de aviones cuya frecuencia de la falla es baja, sin embargo las consecuencias que esto puede generar si no se actúa con prontitud puede terminar con consecuencias fatales, lo que implica un riesgo muy elevado.



2.2. Confiabilidad

La confiabilidad puede ser tratada como la expectativa que se espera obtener acerca del funcionamiento de algún equipo o activo de defensa o en otras palabras como va a funcionar o se va a desempeñar el equipo en la tarea que le corresponde realizar en función al tiempo.

Confiabilidad es un concepto fundamental en el cálculo del diseño de los activos de defensa y puede ser definido como *“la probabilidad de que un artículo funcionará sin fallas por un período de tiempo establecido bajo condiciones específicas”* (Andrews and Moss, 2002, p. 3).

La confiabilidad al tratarse de un atributo que es medible puede ser expresada y explicada mediante una ecuación (2), (asumiendo que distribuye exponencialmente).

Ecuación (2) para una tasa de riesgo constante:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (2)$$

Donde $R(t)$ es una función que indica la probabilidad de que una operación sea exitosa en un período de tiempo t y con una λ constante que indica el riesgo o la tasa de falla.

La confiabilidad se puede modelar por medio del uso de distribuciones paramétricas, ya que una distribución ayuda a inferir acerca del comportamiento de la confiabilidad.

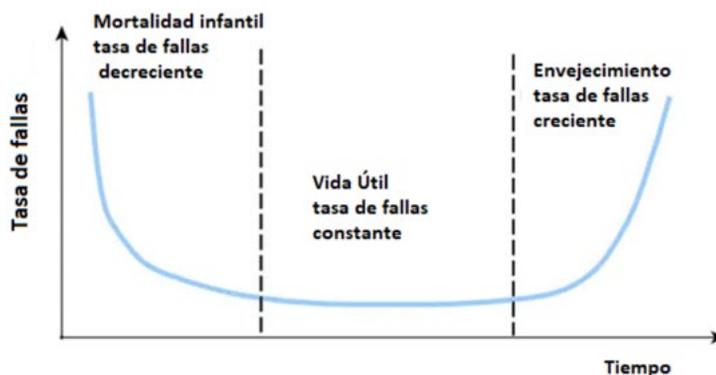


Figura N° 1: Diagrama curva de bañera.

Fuente: Modificada de (Mantenimiento Industrial, s.f.).

La figura N° 1 “curva de bañera” representa tres funciones en tres etapas diferentes y en cada una se relaciona con distintas tasas de fallas en función del tiempo. Existen



diferentes tipos de distribuciones como Weibull, Exponencial, Normal, Binomial, Poisson, Hipergeométrica, entre otras. La etapa de mortalidad infantil puede estar modelada por una distribución de Weibull, vida útil por una distribución Exponencial y envejecimiento por una distribución Normal (Reyes, H., 2019).

Se distinguen tres etapas dentro del diagrama:

Etapa I: la etapa de quemado o juventud donde la tasa de falla o riesgo es alta, pero a medida que avanza el tiempo esta tasa comienza a disminuir producto de que se eliminan los componentes débiles (Andrews and Moss, 2002).

Generalmente se realizan ajustes por problemas de fabricación y diseño.

Etapa II: etapa de la vida útil en la cual la tasa de riesgo o falla permanece constante (Andrews and Moss, 2002).

Son las fallas que son constantes en el tiempo, como por ejemplo el juego presente en un torno convencional debido a que el plato y usillo deben ajustarse cada vez que se utiliza.

Etapa III: etapa de desgaste en la cual los componentes del sistema con el uso y el tiempo comienzan a desgastarse y generan que la tasa de falla aumente (Andrews and Moss, 2002).

Lo que sucede en esta etapa es que los sistemas complejos cumplen con el tiempo de vida útil.

En la etapa I la falla se relaciona con fallas de tipo errores de diseño, malas instalaciones o debido a que el operador encargado desconoce todos los aspectos del sistema. En la etapa II la falla se genera por factores externos como una mala operación del sistema complejo o condiciones inadecuadas e inseguras del entorno y en la etapa III la tasa de fallas es creciente en el tiempo, lo que ocurre por el desgaste generado en el sistema complejo producto de la utilización de este.

2.3. Mantenibilidad

La mantenibilidad es un factor clave para el Ejército de Chile, ya que, al poseer una gran cantidad de activos adquiridos de segunda mano, es necesario enfocar los esfuerzos en el mantenimiento. Esto requiere de los correctos parámetros de mantenibilidad (capacitación, equipos, calzos de mantenimiento, herramientas, infraestructura, personal especializado, entre otros) para lograr el cumplimiento de las funciones encomendadas



con respecto al tiempo de ejecución y esto abarca desde cosas tan sencillas como realizar una mantención o cambio de neumáticos a los camiones de la flota de vehículos de rueda del Ejército de Chile, cuya tarea de mantenimiento lograría disminuir los tiempos de reacción frente a una emergencia que requiera de la movilidad inmediata de todas las unidades militares que prestan servicios de apoyo a la comunidad, o incluso hasta realizar mantención a una caldera pirotubular de una termoeléctrica y cuyo trabajo de mantención podría eventualmente ahorrar millones de pesos mensualmente.

Una definición aceptada internacionalmente es la siguiente *“la capacidad de mantenimiento de un sistema se puede definir como la probabilidad de que el sistema se restaurará a una condición completamente operativa dentro de un período de tiempo especificado”*. (Andrews and Moss, 2002, p. 287).

Es recomendable programar las acciones de mantenimiento antes del uso de vehículos y flotas militares y no durante el cumplimiento de las funciones para las que se les requiere, considerando el hecho de que el riesgo de que ocurra una falla siempre está latente y más aún, si la flota y los vehículos han enfrentado imperfecciones técnicas, o no han sido ajustados ni cambiadas las partes y piezas degradadas, ya que al no realizar las tareas de mantenimiento correctamente, el costo monetario asociado puede ser elevado. Para reducir la posibilidad de que ocurra algún inconveniente el mantenimiento que se lleve a cabo debe ser de tipo preventivo y, además, debe ser evaluado de manera regular el estado del activo de defensa, con métodos predictivos, al objeto de disminuir mantenimientos del tipo correctivo. En general, los tipos de mantenimiento aceptados mundialmente son los siguientes:

Mantenimiento preventivo: mantenimiento realizado a intervalos predeterminados o según los criterios prescritos y destinados a reducir la probabilidad de falla o la degradación del funcionamiento de una entidad (Verma, 2015).

Por ejemplo, el tipo de mantenimiento que se realiza a un Bulldozer debido a la poca adherencia que está generando el tren de rodamiento ante las diferentes superficies de contacto y que puede prever una falla por desgaste de estos, es decir se puede prevenir una falla por el desgaste.

Mantenimiento predictivo: tipo de mantenimiento que se hace continuamente o a intervalos que se rigen según la observación que se requiere hacer para monitorear, marcar o diagnosticar una estructura, sistema o componentes (Verma, 2015).

Por ejemplo, el mantenimiento que se realiza a los aviones militares después de cumplir con los vuelos en donde transportan pasajeros, insumos a comunidades o bases militares o muchas veces por ser vuelos de prueba.



Mantenimiento correctivo: tipo de mantenimiento realizado después de reconocer la falla para poner a una entidad en un estado en el que pueda realizar la actividad requerida (Verma, 2015).

Por ejemplo, el mantenimiento realizado a una perforadora minera en la que su sistema hidráulico colapsa producto de un exceso de presión de aire.

La mantenibilidad es un término cuantificable que depende de condiciones explícitas e implícitas como lo son el ambiente y lugar de trabajo, el tipo de capacitación que recibe el personal a cargo, etc. Considerando el tiempo como uno de los factores explícitos relevantes (Andrews and Moss, 2002).

El modelo de mantenibilidad se define en base a factores como tiempo entre las fallas, tiempo de las actividades (la puesta en marcha del sistema complejo, preparación del área de trabajo, tiempo que toma el encargado para realizar el trabajo, tiempos de inspección y revisión, etc.), como, por ejemplo, el tiempo que se requiere para poner la máquina en funcionamiento, tiempos medios y máximos de reparación, disponibilidad de repuestos y herramientas, etc.

El concepto de mantenibilidad puede ser modelado considerando lo siguiente (Andrews and Moss, 2002). (Ver ecuación 3).

Capacidad de mantenimiento $M(t)$
Función de densidad de probabilidad $m(t)$
Intensidad de reparación condicional $\mu(t)$

$$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (3)$$

Si se considera la función como una constante la mantenibilidad se puede modelar de la siguiente manera (Andrews and Moss, 2002). (Ver ecuación 4).

$$M(t) = \int_0^{\infty} e^{-\mu * t} dt \quad (4)$$

Para una distribución exponencial de los tiempos de reparación, la distribución acumulada se considera (Andrews and Moss, 2002). (Ver ecuación 5).

$$M(t) = 1 - e^{-\mu * t} \quad (5)$$



El tiempo medio de reparación está representado (Andrews and Moss, 2002). (Ver ecuación):

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

La ecuación expuesta que representa al "Mean Time To Repair" (tiempo medio de reparación).

El tiempo medio entre fallas (Andrews and Moss, 2002). (Ver ecuación):

$$MTBF = \frac{\sum t_i}{n} \quad (7)$$

t_i = tiempo total de operación

n = número total de fallas

Ejemplo: uno de los camiones de la flota DIVMAN cuyo tiempo de falla tiene una distribución exponencial. La tasa de falla expresada como número de falla por hora es de $\lambda=0.0005$.

Para obtener la función de confiabilidad del sistema usando la ecuación 2 se obtiene que:

$$R(t) = e^{-0.0005*t}$$

Para calcular la confiabilidad del sistema después de 100, 150 y 200 horas de operación se reemplaza la variable tiempo en la ecuación anterior:

$$R(100) = e^{-0.0005*100} = 0.951229$$

$$R(150) = e^{-0.0005*150} = 0.927743$$

$$R(200) = e^{-0.0005*200} = 0.904837$$

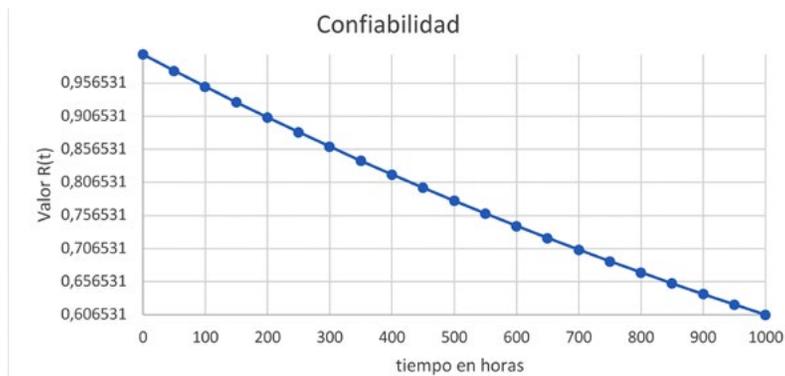


Figura N° 2: Gráfico de confiabilidad.

Fuente: Elaboración propia.



De la figura N° 2, se observa que a medida que transcurre el tiempo, la confiabilidad va disminuyendo a medida aumentan las horas de operación y trabajo del sistema.

Para hallar la tasa de falla del sistema al utilizar la ecuación 3 donde $m(t)$ corresponde a la derivada de la ecuación 5, se obtiene que:

$$\mu = \frac{0.0005 * e^{-0.0005*t}}{1 - (1 - e^{-0.0005*t})} = 0.0005$$

El tiempo medio de falla del sistema MTTF se obtiene a partir de la ecuación 4:

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-0.0005*t} dt = -0.0005 * t$$

El tiempo medio de reparación, utilizando la ecuación 6:

$$MTTR = \frac{1}{0.0005}$$

En el mantenimiento se deben considerar dos opciones para mantener el sistema cuando existe una falla, consiste en reparar o realizar una mantención y una opción es más conveniente que la otra dependiendo de la etapa en la que se encuentre el activo o sistema complejo.

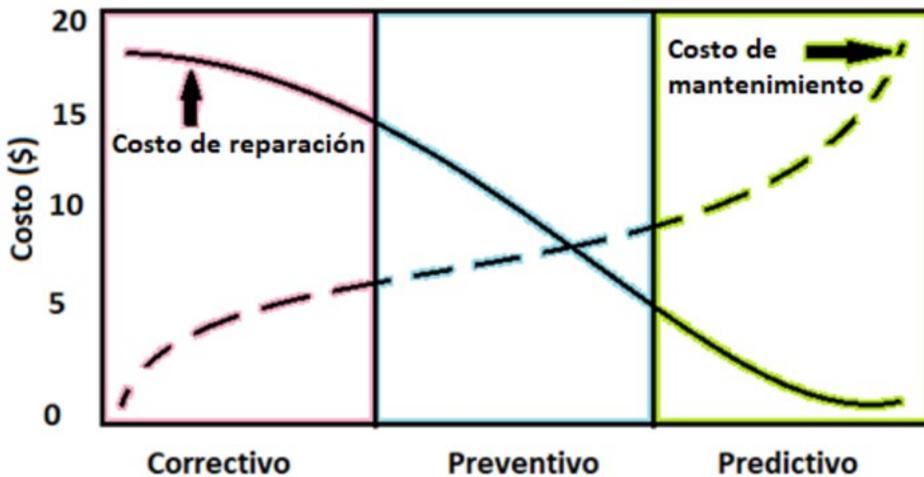


Figura N° 3: Diagrama de costos, costos de reparación y mantenimiento.

Fuente: Modificada de (Reyes, 2019).



La figura N° 3 representa costo de mantenimiento versus costo de reparación para cada tipo de mantenimiento (correctivo, preventivo, predictivo). En un mantenimiento correctivo el costo presenta ser más elevado si se repara la falla a que si se realiza un mantenimiento al contrario del mantenimiento predictivo en el cual el costo de reparación resulta ser más económico que aplicar mantención.

2.4. Disponibilidad

Disponibilidad es el principal indicador clave de desempeño (KPI), utilizado en la gestión de la flota de defensa del Ejército de Chile. La disponibilidad es una proporción del tiempo total en que un activo estuvo en uso o pudo haber sido utilizado, aunque para el autor Ajit Kumar Verma se define como *“la probabilidad de que un producto o sistema esté en funcionamiento en un momento o tiempo especificado”* (Verma, 2015, p. 6), esta definición no es del todo correcta debido a que la disponibilidad es la proporción de tiempo que un sistema está en condiciones de funcionamiento. Esto a menudo se describe como una tasa capaz de misión.

La disponibilidad es una medida cuantificable que se representa de distintas formas según el tipo de mantenibilidad que se requiera, como por ejemplo la puntual, promedio, inherente, lograda, operacional, etc. En este artículo se presentarán dos tipos de disponibilidad, la inherente y puntual.

Para el caso de la ecuación 8, esta fórmula corresponde a disponibilidad inherente para un solo componente.

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (8)$$

Con MTTF definido como “mean time to failure” (tiempo medio para fallas).

La siguiente ecuación corresponde a disponibilidad inherente para un sistema:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (9)$$

Con MTBF definido como “mean time between failures” (tiempo medio entre fallas).

La disponibilidad inherente es la que las empresas suelen usar para entregar información acerca de sus productos y solo considera el tiempo de inactividad del mantenimiento correctivo y excluye el del mantenimiento preventivo (Weibull, 2020).



La disponibilidad instantánea o puntual es la que generalmente utiliza el Ejército debido a que en ocasiones donde se requiere realizar misiones a la brevedad y es necesario estimar la disponibilidad del sistema (Weibull, 2020).

La ecuación 10 corresponde a disponibilidad puntual para un sistema:

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u)m(u)du \quad (10)$$

Esta ecuación nace de las siguientes consideraciones (Weibull, 2020).

El sistema funcionó correctamente entre el tiempo de 0 a t y si no ocurrió una falla, entonces la probabilidad de que esto ocurra es $R(t)$.

El sistema funcionó correctamente desde la última reparación en un tiempo u entre 0 y t $\int_0^t R(t-u)m(u)du$.

La suma de ambas condiciones genera la ecuación de disponibilidad puntual para un sistema (ecuación 10).

Para los componentes no reparables, como por ejemplo una ampolleta o un sistema de frenos ya gastado, la confiabilidad y la disponibilidad son iguales en términos numéricos (Verma, 2015), pero continúan siendo distintos en su concepto.

Los conceptos previamente explicados son partes fundamentales de lo que comprende la acción del mantenimiento. Para realizar el correcto mantenimiento a un sistema complejo o cualquier tipo de sistema se debe analizar cada uno de los puntos expuestos, sin embargo, siempre se busca mejorar en la medida que se creen nuevas herramientas de trabajo. El tema para exponer a continuación procederá a explicar que es lo que actualmente se está estudiando para mejorar la evaluación de los activos de una forma sistémica.

2.5. Ingeniería de resiliencia

Referirse a riesgos, disponibilidad, mantenibilidad, confiabilidad y querer evaluarlo todo dentro de un solo concepto implica referirse a la ingeniería de resiliencia, que además se define como una nueva corriente tecnológica que busca modelar los sistemas complejos y su entorno desde una perspectiva sistémica integral, y que en términos militares cada uno de los factores que influyen en las funciones de los activos de defensa sean incorporados al modelo en estudio. Esto incluye cualquier



tipo de situación que pueda influir en el correcto funcionamiento de los sistemas, incluyendo aspectos externos como accidentes, actos terroristas o incendios, los que son considerados como fallas del sistema de seguridad. En términos ingenieriles la resiliencia se presenta como una nueva corriente de ingeniería que busca el estudio sistémico de los eventos perturbadores para que así el sistema pueda volver a la normalidad luego del evento perturbador como lo es en caso de catástrofes naturales, por ejemplo, terremotos. En dicha situación el Ejército de Chile despliega su flota de emergencia para lograr volver a la normalidad y que así la capacidad del sistema vuelva a ser estable, todo esto dentro del menor tiempo posible con el objetivo de minimizar el tiempo de restauración.

El objetivo de la resiliencia es que un activo pueda mantener su capacidad de funcionamiento a pesar de los eventos perturbadores y de la inestabilidad que constantemente existe ya que dentro del análisis del desempeño de las flotas militares ante estados de catástrofes siempre el ambiente será dinámico, lo que dificultará las labores, pero que la ingeniería de resiliencia ayudará a estabilizar. Pero ¿cómo saber si un sistema es resiliente o no?, esta respuesta recae en el análisis de diferentes factores como seguridad, resistencia, límites, riesgos, adaptabilidad, reorganización y renovación. Sin embargo, el prevenir o el mantener un control por sobre lo que puede o no suceder también es base de estudio para el concepto de resiliencia “la incertidumbre” ya que un problema que enfrenta es la vulnerabilidad frente a situaciones imprevistas (Furuta).

Para conceptualizar resiliencia como un modelo sistémico existen estudios sobre los análisis de los accidentes. Con el pasar del tiempo se desarrolló un modelo de accidentes, donde se reconocen tres modelos principales: modelo lineal, modelo epidemiológico y el modelo sistémico, los cuales ayudarán a comprender de qué forma es mejor abordar un evento disruptivo que pause o interrumpa las funciones del Ejército de Chile cuando prestan servicios a la población ante eventos catastróficos.

Modelo lineal: este modelo de Heinrich explica que un accidente ocurre cuando una serie de eventos suceden en un orden específico, es decir, como un efecto dominó. La causa de la falla erradica desde la raíz del problema y que suele ser asociado a un funcionamiento incorrecto que puede ser tanto del sistema complejo como acciones humanas incorrectas. Las contramedidas o resguardos que se deben tomar son eliminar eventos o situaciones que pueden convertirse en la causa de un accidente (Furuta).

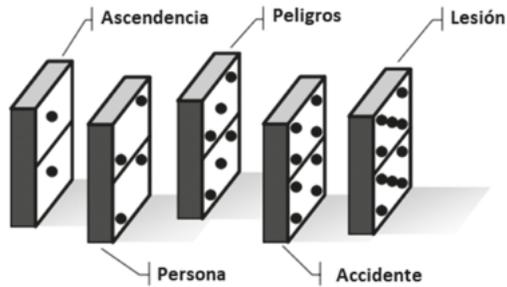


Figura N° 4: Modelo lineal (dominó).

Fuente: Modificada de (Erick Hollnagel, David Woods, 2006).

Por ejemplo, una cinta transportadora la cual funciona en base a un eje que gira concéntricamente y que dicho giro del eje es permitido por el funcionamiento de un motor. Si el motor comienza a fallar implica que el movimiento del eje también fallará y por ende la transmisión del movimiento a las cintas transportadoras no será eficiente.

Modelo epidemiológico: modelo del queso suizo postula que *“una combinación de múltiples fallas y condiciones latentes causan un accidente”* (Furuta). La causa de las fallas se origina en la degradación de las barreras de seguridad físicas, funcionales, simbólicas y conceptuales y la forma de evitar la falla consiste en detectar y reparar la degradación de las barreras de seguridad de forma organizada (Erick Hollnagel, David Woods, 2006).

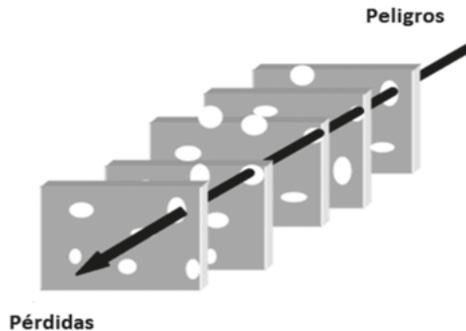


Figura N° 5: Modelo queso suizo.

Fuente: Modificada de Resilience Engineering concepts and precepts, p. 12.

El modelo del queso suizo comprende una serie de componentes identificables donde *“fallas”* (y riesgos) se consideran debido a las fallas de los componentes, la mayoría visiblemente como el colapso de las defensas (Erick Hollnagel, David Woods, 2006).

Por ejemplo, el caso de la plataforma petrolífera Piper Alpha en la cual una combinación de múltiples fallas y condiciones generaron un desenlace fatal para la plataforma. Una com-



binación de tareas de mantenimiento, desajustes y la poca comunicación entre encargados fueron los detonantes para generar la catástrofe. La bomba “A” fue aislada para realizar tareas de mantenimiento, quedando así imposibilitada de realizar sus funciones y la falta de comunicación entre el personal responsable generó que la bomba “B” fuese activada sin considerar que la bomba “A” estaba fuera de servicio, seguido de la acción el condensado filtrado se incendió generando la primera explosión (The Chemical Engineer, 2020).

Modelo sistémico: este tipo de modelo define la resiliencia como la capacidad que posee un sistema de adaptarse ante las perturbaciones y no tratar de evitarlas y define la falla como una combinación inesperada de variables que contribuyen al accidente.

El problema que presenta este modelo es que la falla no puede definirse como un conjunto de sucesos que ocurren en cadena, lo que intenta explicar que no existe una guía para encontrar la solución sino que más bien al tratar al sistema complejo como dinámico no existe un control por sobre lo que puede o no pasar y que al encontrar una estabilidad dinámica esta puede cambiar a una inestabilidad dinámica, pero que dentro de la dinámica se busca que los sistemas sean restringidos o dinámicamente estables (Erick Hollnagel, David Woods, 2006).

Lo que plantea Kazuo Furuta como contramedida es el monitoreo y amortiguamiento de la variable de rendimiento (Furuta).

Por ejemplo, un aluvión que ocurre producto de la acumulación de agua en el suelo a raíz de intensas lluvias o por el deshielo gracias al cambio climático genera el bloqueo de caminos y vías de acceso a la comunidad dejando a esta aislada. El Ejército de Chile en apoyo a la emergencia debe actuar de forma rápida y eficiente para sobreponerse al evento perturbador, despejando caminos y evacuando a la población del lugar intentando mantener o lograr la estabilidad dentro la situación dinámica.

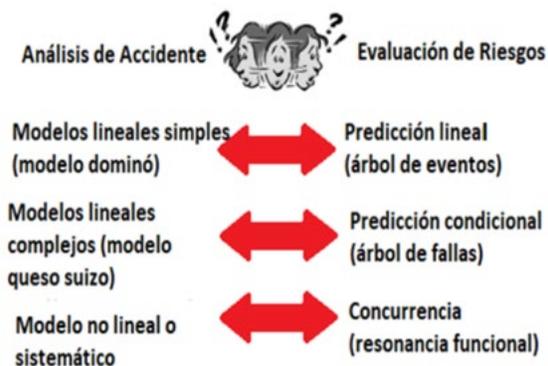


Figura N° 6: Resilience Engineering concepts and precepts, p. 15.

Fuente: modificada de Resilience Engineering concepts and precepts, p. 15.



La figura N° 6: explica que para cierto tipo de análisis existe una evaluación de los riesgos y es que para accidentes que se catalogan como “pequeños” o “menores”, los modelos de predicción de árbol son los más adecuados de usar ya que para accidentes que son menos complejos las explicaciones suelen ser más sencillas y menos elaboradas ya que resulta ser más sencillo descubrir el origen de la falla, sin embargo, este tipo de predicción de árbol no resulta útil para fallas “grandes” o que requieren de una explicación más compleja debido a que su estructura es fija. El modelo de resonancia funcional comprende los eventos dinámicos, lo que resulta ser un mejor método para la evaluación de los sistemas complejos (Erick Hollnagel, David Woods, 2006).

A modo de ejemplo la predicción lineal es aplicada para el caso en que una flota de camiones cisterna presenta fallas en dos de sus seis neumáticos, las fallas ocurren por desgaste de los surcos o por una falta de presión interna (aire). En este caso el modelo de predicción de árbol de eventos funciona debido a que la explicación de la falla es sencilla. En el caso que la flota de camiones se viera enfrentada a un tipo de evento disruptivo como una fuga en el tanque de almacenamiento de los fluidos que transporta, si el fluido filtrado corresponde a agua, la falla no representa ser una de alto riesgo, pero si el fluido filtrado corresponde a combustible, entonces mediante la aplicación modelo sistemático se debe buscar una solución y no tratar de evitar la falla de forma que, rápidamente se le permita a la flota volver a la normalidad dentro de sus actividades.

En casos cuando lograr una mayor confiabilidad del sistema ya no es asequible y el fracaso es inevitable, la capacidad de recuperación de ingeniería ofrece la capacidad de sobrevivir a los fracasos y recuperarse de las calamidades. La resiliencia es particularmente apropiada cuando se espera que el sistema sobreviva y pueda recuperarse de las interrupciones de baja frecuencia y alto impacto (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Los gráficos son una forma de representar para explicar y visibilizar cómo funciona la resiliencia en un sistema complejo ante eventos perturbadores que irrumpen afectando la capacidad del sistema y para ello existen las Curvas de ingeniería de resiliencia.

Curva de ingeniería de resiliencia

“Los investigadores han utilizado las propiedades de la curva de resiliencia para medir cuantitativamente el nivel de resiliencia del sistema” (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

La primera gráfica muestra que un determinado sistema trabaja con una capacidad inicial desde un tiempo hasta un tiempo, se entiende capacidad del sistema como la función en la que el sistema logra funcionar y mantener la función sin fallas.

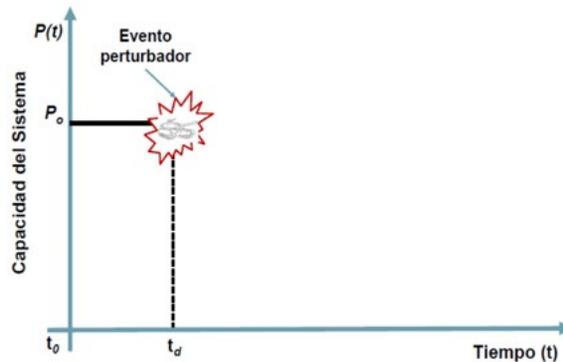


Figura N° 7: Capacidad inicial del sistema.

Fuente: (Reyes, 2019).

El sistema trabaja dentro del orden establecido hasta que se ve afectado por un evento perturbador que genera la inestabilidad del sistema.

Por ejemplo, un tanque de combate que, por características de diseño, puede circular por terrenos irregulares (arena, lodo, rocas, etc.), gracias a su sistema de movilidad tipo oruga y que puede girar sobre su propio eje se ve en la obligación de detener sus labores debido a que un eslabón del tren de rodadura se fracturó.

La segunda gráfica muestra el comportamiento del rendimiento de un sistema de ingeniería resistente comparado con el de un sistema de ingeniería no resistente, después de ser sometido a un evento disruptivo.

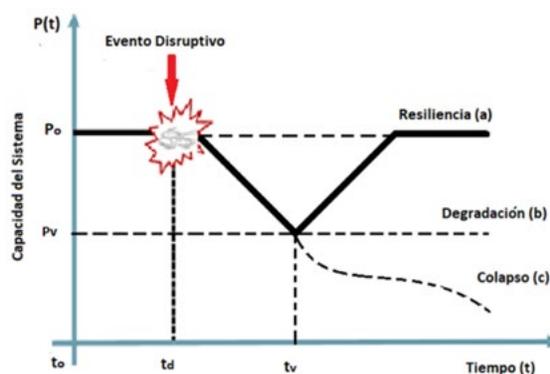


Figura N° 8: Comportamiento resiliente vs Comportamiento no resiliente.

Fuente: Modificada de (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

La gráfica expone tres posibles estados finales a los que puede llegar el sistema complejo luego de enfrentarse a un evento disruptivo y ser sometido a la etapa de recuperación.



La gráfica (a) sugiere que cuando el sistema complejo es resistente existe la opción de que el sistema pueda recuperar la capacidad que poseía antes del evento disruptivo. Lo que implica que el sistema logra volver a realizar las labores con total normalidad (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

La gráfica (b) ejemplifica el caso en que un sistema complejo que no es resistente no será capaz de mantener su capacidad luego del evento disruptivo, sino que la disminuye gradualmente y de llegar a una estabilidad será por debajo de la capacidad inicial del sistema y que dependiendo de las capacidades inherentes del sistema puede llegar a un buen o mal estado de degradación (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

En (c) el sistema no logra reponerse luego de la perturbación lo que genera una disminución de la capacidad hasta probablemente llegar al colapso de este (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Por ejemplo, un camión cisterna que transporta agua a comunidades que enfrentan sequías producto del cambio climático se enfrenta a un problema de desgaste de los surcos de sus neumáticos, lo que puede generar un accidente por deslizamiento al frenar o al tomar alguna curva. El desgaste de los neumáticos es un evento disruptivo que genera la interrupción de las actividades del camión y por ende una disminución de su capacidad. La ingeniería de resiliencia se aplica de tal modo que se buscará una solución rápida y buena, cambiando así los neumáticos desgastados por los que se traen de repuesto o acudiendo a algún centro de reparación mecánica que se encuentre próximo. Si el trabajo de reparación es correcto el camión retomará rápidamente sus actividades, mientras que si la reparación es regular puede que en unos cuantos kilómetros más el camión se vuelva a enfrentar al mismo evento disruptivo y si no se logra encontrar una solución ante el evento perturbador la capacidad del sistema tenderá al colapso siendo imposible recuperar la capacidad inicial del camión.

La tercera gráfica muestra cuatro estados en la línea de tiempo:

Estado de confiabilidad (SI): estado original cuando el sistema funciona normalmente antes de que ocurra el evento perturbador, trabajando a una capacidad P_0 (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Estado de falta de confiabilidad (SII): estado vulnerable, el sistema comienza a degradarse hasta una P_v capacidad en el momento t_d (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Estado de recuperación (SIII): si el sistema mejora sus funciones de rendimiento como resultado de la restauración, las acciones de restauración ocurren instantáneamente entre los tiempos t_v y t_n (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Estado estable (SIV): el sistema alcanza un rendimiento estable en el tiempo t_n después de haber pasado por del estado de recuperación (Nita Yodo, Pingfeng Wang).



Figura N° 9: Curva de resiliencia de cuatro estados.

Fuente: Modificada de (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Continuando con el ejemplo expuesto en el análisis de la figura 7, sobre tanques oruga y la fractura de uno de sus eslabones. Antes del evento perturbador el sistema complejo trabaja a una capacidad constante hasta cierto tiempo t_d , pero luego de la perturbación se presenta una inestabilidad dinámica, lo que genera que la capacidad del sistema disminuya en el tiempo, que el sistema se torne vulnerable y se vea envuelto en una zona de no confiabilidad.

La ingeniería de resiliencia busca actuar de forma rápida en la zona de recuperación, disminuyendo los tiempos que en este caso tomaría realizar el cambio o reparación del eslabón para poder así llevar nuevamente al sistema a un estado estable de capacidad.

La cuarta gráfica representa una variación de la curva de resiliencia y estas variaciones se realizan dependiendo del campo de estudio que se quiera analizar.

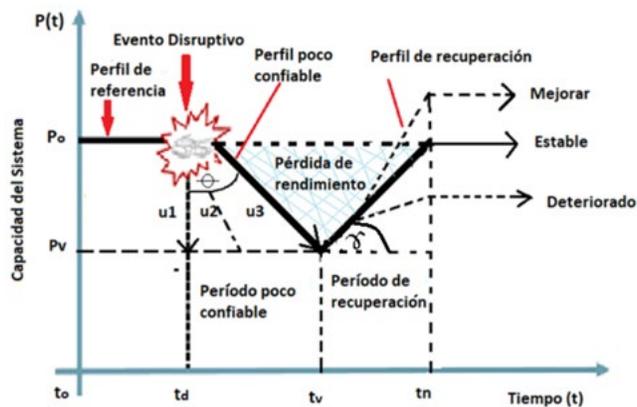


Figura N° 10: Variantes de una curva de resiliencia general.

Fuente: Modificada de (Nita Yodo, Pingfeng Wang).



Lo que se muestra la diferencia entre P_o y P_{ves} es el nivel de impacto que se genera después del evento disruptivo. Se logra apreciar tres perfiles diferentes de falta de confiabilidad u_1 , u_2 , u_3 (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

u_1 : perfil de alta confiabilidad muestra una caída del rendimiento vertical en función del ángulo Θ , en este caso el sistema es incapaz de soportar el impacto de una perturbación, donde la perturbación puede ser inevitable y hasta destructiva (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

u_2 : perfil de falta de confiabilidad muestra una disminución gradual del rendimiento del sistema y estabilizado en un estado disruptivo estable antes de que ocurra la recuperación (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

u_3 : expresa una disminución gradual del rendimiento del sistema y recuperación inmediata (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Entre los tiempos td , tu y tn , se ubican los períodos de no confiabilidad y de recuperación y se destaca que en el perfil de recuperación para llegar al tiempo tn se pueden dar tres caminos (durante el período de recuperación), llegar con el sistema deteriorado, con un sistema estable o mejorado (con una mejor tasa de rendimiento que en el comienzo).

El desempeño del área de pérdida (sección sombreada triangular) representa la pérdida de rendimiento que se produce después de una perturbación. La disminución de capacidad del sistema complejo varía debido al tipo de estabilidad al cual se logra llegar después de la zona de recuperación.

A modo de ejemplo en un perfil tipo u_1 un camión cisterna que transporta combustible para recargar a la flota de camiones que está prestando servicios de transporte a la comunidad producto de aluviones se vuelca debido a un mal manejo de curva en el camino generando una situación que termina en una explosión producto del combustible, quedando totalmente inactivo el sistema complejo. Un ejemplo para perfil u_2 es un avión Hércules, muchas veces utilizado para el transporte de pasajeros, tropas, misiones de búsqueda y rescate y lucha contra incendios son algunos de sus aportes, este avión posee cuatro motores y ante algún evento disruptivo que genere la falla de alguno de estos, este sistema complejo posee la capacidad de poder funcionar con dos de sus cuatro motores y adaptando esta situación al gráfico de la figura 10, al perder uno o dos motores la capacidad del sistema disminuye pero logra estabilizarse al poder funcionar solo con dos y así mantener esa capacidad estable hasta que comience la recuperación.

La gráfica cinco también muestra una de las variaciones que presenta la curva de resiliencia.

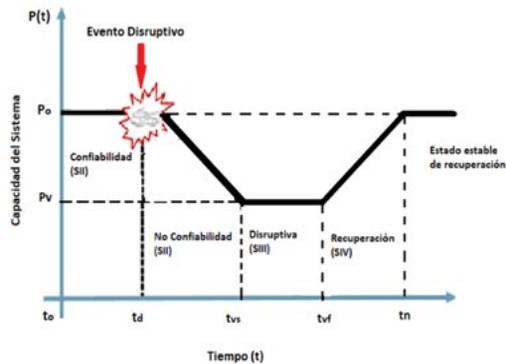


Figura N° 11: Curva de Resiliencia de Ingeniería de 5 estados.

Fuente: Modificada de (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Se distinguen cinco zonas con un comportamiento lineal, confiabilidad, no confiabilidad, destrucción, recuperación, estado estable de recuperación.

Con el ejemplo dado para en análisis de la figura 8, cambiando el origen de la falla de los neumáticos a una falla en el sistema de suspensión del camión cisterna ya no resulta tan sencillo buscar una solución de forma rápida al evento disruptivo que genera una disminución de la capacidad del sistema. Si bien la reparación del sistema de suspensión implica una rápida recuperación el sistema, la duración de la zona disruptiva entre los tiempos T_{vs} y T_{vf} es debido a que no se cuenta inmediatamente con los implementos para la reparación generando que la recuperación del sistema tarde en comenzar.

La gráfica 6 representa la curva de resiliencia, pero en un modelo no lineal que es lo que se acerca a la realidad, se puede reconocer cuatro representantes del comportamiento en el perfil de recuperación.

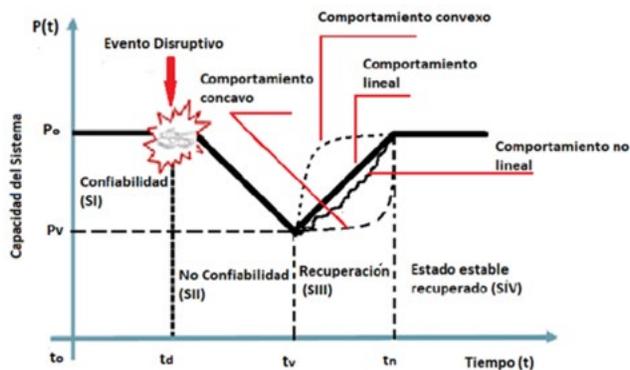


Figura N° 12: Diferentes comportamientos en la zona de recuperación.

Fuente: Modificada de (Nita Yodo, Pingfeng Wang).



Las cuatro zonas están compuestas por zona de confiabilidad, zona de no confiabilidad, zona de recuperación, estado estable de recuperación. En la zona de recuperación (SIII) se distinguen cuatro comportamientos, convexo, cóncavo, lineal, no lineal (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

La zona de recuperación presenta distintos comportamientos: lineal, cóncavo, no lineal y convexo. Un comportamiento cóncavo implica que no existe una relación de proporción igual entre el tiempo y la capacidad del sistema, este tipo de comportamiento tarda un mayor tiempo para que comience la recuperación del sistema hasta alcanzar la estabilidad, por ejemplo, el sobrecalentamiento del motor de un camión, ya que este primero deberá enfriarse para volver pronto de manera rápida a funcionar con su capacidad inicial.

Para un comportamiento convexo entre los tiempos t_v y t_n el sistema complejo comienza más rápido a recuperar la capacidad del sistema (en menos tiempo que un comportamiento cóncavo), por ejemplo, realizar la recarga de combustible a un camión que ha quedado sin suministro en medio de sus funciones.

Para el comportamiento lineal la relación entre tiempo y capacidad es directamente proporcional.

La gráfica 7 muestra la forma de cuantificar la pérdida de capacidad de un sistema tomando en consideración un comportamiento lineal.

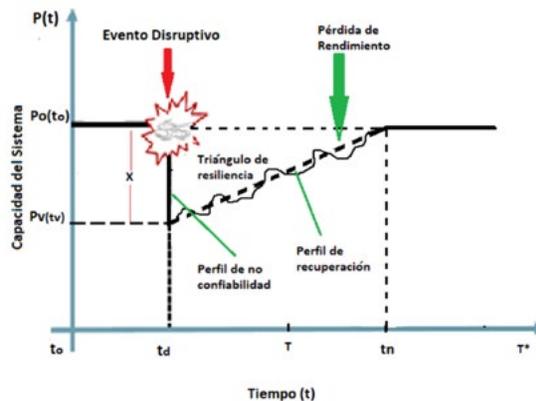


Figura N° 13: Pérdida de rendimiento prevista.

Fuente: modificada de (Nita Yodo, Pingfeng Wang).

Los investigadores han utilizado las propiedades de la curva de resiliencia para medir cuantitativamente el nivel de resiliencia del sistema. $P_o(t_o)$ es la función de rendimiento



inicial hasta un tiempo t_d , $P(t)$ es la calidad de rendimiento de un sistema que varía en el tiempo y el área triangular corresponde a la pérdida de capacidad del sistema.

Se denomina pérdida de capacidad del sistema o área de impacto IA como ψ loss.

Cuando la recuperación es lineal el cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\psi = P_0(t_0) - \frac{x_* t}{2} * \left(\frac{1}{T_*} \right) \quad (11)$$

Cuando la recuperación es no lineal el cálculo se aproxima con la ecuación integral:

$$\psi_{\text{loss}} = \int_{t_d}^{t_n} [P_0(t_0) - P(t)] dt \quad (12)$$

La utilización del método de integración es para sumar las secciones de área dentro del triángulo de resiliencia.

Para todos los sistemas complejos que se enfrentan a un evento disruptivo presentan una pérdida de capacidad del sistema que está comprendida por el tiempo que va desde que aparece el evento perturbador hasta que se logra el estado estable y la diferencia que existe entre la capacidad inicial del sistema y la disminución de la capacidad del sistema.

4. ESTADO DEL ARTE

¿Qué es lo que se ha hecho o investigado hasta ahora en relación con la ingeniería de resiliencia?

La ingeniería de resiliencia no solo se ha aplicado a sistemas mecánicos o productivos, también se ha encargado de indagar en otras áreas dependiendo de los intereses, necesidades y valoraciones.

Se puede definir resiliencia en diferentes áreas como, por ejemplo:

Resiliencia ecológica: una medida de la persistencia de los sistemas y de sus capacidades de absorber cambios y perturbaciones y aún mantener las mismas relaciones entre poblaciones o variables de estado (Furuta).

Resiliencia sísmica: la capacidad de los sistemas físicos y sociales para soportar las fuerzas y demandas generadas por terremotos y para hacer frente a impactos del



terremoto a través de evaluación de la situación, respuesta rápida y efectivas estrategias de recuperación (Furuta).

Resiliencia económica: capacidad de escapar de graves crisis económicas, o para recuperarse de las crisis mitigando la influencia de choques externos (Furuta).

Resiliencia empresarial: capacidad de responder y adaptarse rápidamente a perturbaciones internas o externas de oportunidades comerciales, demandas, confusiones y amenazas, para suprimir sus impactos y para continuar las operaciones comerciales (Furuta).

En Chile existe el Instituto para la Resiliencia ante Desastres y lo que busca esta institución es hacer de Chile un referente internacional en resiliencia ante desastres, a través de la creación de bienes públicos y la articulación de los esfuerzos de I+D+i+e.

La contribución de busca hacer esta institución es la creación de bienes públicos como instrumentos de medición y análisis de resiliencia, insumos técnicos, recursos educativos. Generación de capacidades para I+D+i+e (investigación, desarrollo, innovación y educación) en resiliencia como capital humano, infraestructura de datos, plataformas experimentales y dentro de un fomento de una economía resiliente ante desastres se basa en innovación de procesos para la continuidad operativa (Itrend, s.f.).

Tratándose Chile de un país territorialmente extenso de norte a sur y que cuenta con una variedad climática y que producto del cambio climático hace los climas extremos es de suma importancia contar con el estudio de la ingeniería de resiliencia en desastres naturales ya que el país es altamente propenso a sufrir desastres naturales como terremotos, maremotos, explosiones volcánicas, aluviones, etc.

En el extranjero la Universidad de Nottingham tiene un grupo de investigación de ingeniería de resiliencia que enfoca sus estudios en los sectores de transporte, producción y distribución de energía, servicios públicos y comunicaciones. Este grupo multidisciplinario se dedica a realizar investigaciones sobre técnicas de modelado para predecir formas de mejorar el diseño, mantenimiento y operación de sistemas de ingeniería con el fin de reducir la frecuencia de las fallas y la relación a los estudios de ingeniería de resiliencia se enfocan en mejorar la resiliencia de los sistemas que después de algún evento disruptivo sufren de fallas pequeñas como también peligrosas. Un enfoque muy importante de este grupo es el estudio de la resiliencia frente a desastres naturales provocados por el hombre ya que buscan estudiar la restauración rápida de la funcionalidad de algo tan impredecible como lo es la naturaleza (University of Nottingham, s.f.).



Los estudios de ingeniería de resiliencia apuntan positivamente en muchas áreas ya que no solo se concentran en los procesos productivos, sino que también los estudios se aplican al diseño de modelos de resiliencia para el ecosistema y desastres naturales generados por el hombre. Muchos de los desastres naturales son generados por el hombre y muchas de las fallas de grandes empresas productivas que terminaron con consecuencias fatales también han sido fallas humanas, y para todo esto ya existen estudios y un interés de desarrollo sobre cómo sobrerreponerse y llegar nuevamente a la estabilidad dentro de un tiempo determinado, pero no existen estudios en relación a la resiliencia que apunten a temas como lograr la restauración rápidamente para la flora y la fauna cuando hidroeléctricas o termoeléctricas irrumpen como un evento perturbador la normalidad de las especies que habitan en el sector o temas como aplicar la ingeniería de resiliencia en recursos naturales que ya son escasos como lo es el agua (recurso más importante de la Tierra).

En relación con el Ejército los estudios de resiliencia ante los desastres naturales puede aplicarse a la institución en cuanto a cómo prestan ayuda, pero no existe un estudio que solo trate sobre cómo el Ejército de Chile puede ayudar a restaurar el sistema a la normalidad con el uso de toda la maquinaria con la que cuentan. Como propuesta resulta interesante preguntar qué pasaría si se realizara un estudio de ingeniería de resiliencia en las guerras ya que estas son eventos destructivos y que terminan muchas veces en el colapso, pues al finalizar la guerra la capacidad de todos los sistemas que se vieron afectados disminuye y muchas veces es imposible volver a la estabilidad durante la etapa de recuperación.

5. CONCLUSIONES

El mantenimiento para el Ejército de Chile es una función primordial y por ello la institución cuenta con la División de Mantenimiento (DIVMAN), organismo encargado de la predicción futura de la condición de los activos de defensa a través del Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo (DI2D).

Chile es un país que tradicionalmente se dedica a la exportación de materias primas, y no existe en el país producción de maquinaria pesada, adicionalmente tampoco un país que desarrolla tecnología de punta ni sistemas militares de alta complejidad por ello un tema como la ingeniería de resiliencia es tan importante, ya que el mantenimiento es primordial. Comprar una máquina o algún sistema complejo al extranjero y que este falle, al querer reparar el sistema no resulta ser tan sencillo como querer comprar el repuesto en la tienda de repuestos más próxima ya que, así como el sistema se compró al extranjero también el repuesto debe ser comprado del mismo proveedor y esto genera retrasos en tiempos productivos y pérdidas de productividad y económicas. Por este



motivo la ingeniería de mantenimiento juega una función relevante y es que un estudio profundo explica las características que no solo hace ver este tema como algo superficial, el mantenimiento es un tema serio, ya que si se hace mal las consecuencias pueden llegar a ser catastróficas y claros ejemplos de esas fallas que pudieron ser previstas son el accidente nuclear de Chernóbil en 1960, cuyo resultado catastrófico se ocasionó por un mal diseño de un reactor, el cual fue operado por personal que no estaba entrenado adecuadamente (World Nuclear Association, 2020), la plataforma petrolífera Piper Alpha en la que ocurrió una explosión que cobró cientos de vidas humanas por malas gestiones de mantenimiento (The Chemical Engineer, 2020) o como el caso de la planta nuclear Three Miles Island en 1979 en EE.UU. donde un mal funcionamiento de enfriamiento generó que parte del núcleo se derritiera en uno de los reactores (World Nuclear Association, 2020).

Las fallas son eventos disruptivos o perturbadores y si bien existen estudios que van enfocados a prevenirlas también existe una nueva corriente de ingeniería que apunta a la restauración del sistema, conocida como la ingeniería de resiliencia. Esta rama del mantenimiento llega a generar impacto de manera positiva ya que no solo tiene una aplicación desde el punto de vista ingenieril productivo, sino que puede ser aplicada y lograda en otras áreas generando efectos positivos en términos ambientales y económicos como también ser aplicada a los grupos militares que prestan ayuda y sirven al país y comunidad en estados de emergencias y catástrofes con sus sistemas de camiones y aviones lograrán ser un aporte para llevar un sistema desde el caos hasta nuevamente la estabilidad.

El Ejército de Chile tiene la responsabilidad de actuar de manera inmediata cuando se le requiere y debe desarrollar la capacidad de adaptarse y poder reconocer eventos disruptivos que generen contratiempos en el desarrollo de sus tareas aplicando modelos de detección de riesgos, estrategias para lograr la recuperación de forma rápida ante las fallas y el estudio de ingeniería de resiliencia apunta directamente a estos objetivos.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de sistemas que posee la institución es primordial que quienes estén a cargo del manejo de estos posean los conocimientos sobre la ingeniería de resiliencia para poder afrontar un evento perturbador de manera rápida y como el Ejército de Chile define su misión como una contribución al país y que dentro de sus acciones fundamentales define que *“proteger a la población, instituciones y recursos vitales del país, frente a cualquier amenaza o agresión externa”* es una de sus obligaciones (Ejército de Chile, 2020). Es por ello que el estudio de esta rama del mantenimiento cobra importancia en situaciones como por ejemplo, movilizar una flota de 50 camiones cisterna o movilizar 20 bulldozer en medio de una catástrofe y que ante algún evento disruptivo no se pueda llevar a cabo la misión porque no se posee ningún



plan estratégico que ayude a afrontar la falla implica que no genera ningún sentido tener máquinas si no puedes usarlas, tenerlas y tener la capacidad al cero.

Si bien falta mucho por desarrollar aún de este tema también hay muchas propuestas que generar, ideas que proponer y aplicar en la realidad, ya que la base del estudio es sólida y esta viene a presentarse como la nueva corriente de ingeniería que busca el estudio sistémico de los eventos perturbadores.

BIBLIOGRAFÍA

ANDREWS and MOSS (2002). *Reliability and Risk Assessment*.

Astronautix. (20 de marzo de 2020). Obtenido de <http://www.astronautix.com//lusser.html>

EJÉRCITO DE CHILE (23 de febrero de 2020). Obtenido de <https://www.ejercito.cl/?menu&cid=13>

FURUTA, K. (s.f.). What is Resilience Engineering.

HOLLNAGEL, Erick; WOODS, David (2006). Resilience Engineering concepts and precepts.

ITREND (s.f.). Obtenido de <http://www.itrend.cl>

MANTENIMIENTO INDUSTRIAL (s.f.). Obtenido de <https://mantenimientoindustrialweb.wordpress.com/2016/06/14/curva-de-la-banera/>

REYES, H. (2019). *Ingeniería de Mantenimiento*.

REYES, H. (2019). *La resiliencia en la flota de la Fuerza terrestre, una mirada desde la ingeniería de mantenimiento*.

THE CHEMICAL ENGINEER (21 de febrero de 2020). Obtenido de <https://www.thechemicalengineer.com/features/piper-alpha-the-disaster-in-detail/>

UNIVERSITY OF NOTTINGHAM (s.f.). Obtenido de <https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/resilience-engineering/index.aspx> Weibull. (20 de febrero de 2020). Obtenido de <https://www.weibull.com/hotwire/issue79/re basics79.htm>

VERMA, Ajit Kumar (2015). *Reliability and Safety Engineering*, Verma , S. A.



WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (22 de febrero de 2020). Obtenido de <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (22 de febrero de 2020). Obtenido de <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx>

YODO, Nita; WANG, Pingfeng (s.f.). Engineering Resilience Quantification and System Desing Implications: A literature Survey. *Journal of Mechanical Desing*.

YANG, G. (2007). *Life Cycle Reliability Engineering*.