

# Mantenimiento basado en la condición y predictivo para vehículos militares

*Military Vehicles Maintenance Based in Condition and Predictive*

Academia Politécnica Militar  
*Ejército de Chile*

Resumen: El presente artículo trata de sistemas electrónicos instalados en vehículos blindados, para determinar, remotamente y en tiempo real, el estado mecánico de éstos y predecir fallas en el mediano y largo plazo. En primer lugar, se presenta un sistema desarrollado por el Ejército de EE.UU. para la predicción de fallas en los tanques M-1 A1/A2 Abrams, tanto en su estructura como en el mecanismo de procesamiento y resultados finales. A continuación, se describe un sistema de mantenimiento predictivo y basado en la condición desarrollado entre los años 2013 y 2014 por oficiales e ingenieros de la Academia Politécnica Militar, orientado a la estructura que este tiene, como a la información que presenta y su utilidad.

Palabras claves: Mantenimiento basado en la condición - mantenimiento predictivo - disponibilidad operacional - tiempo real.

Abstract: This article deals with electronic systems installed in armored vehicles to determine remotely and in real time the mechanical state of these and predict failures in the medium and long term. First of all, the article shows a system developed by the US Army for predicting failures in M-1 A1 / A2 Abrams tanks, both in structure and mechanism of processing and final results. Then a predictive maintenance system is described, based on the condition developed between 2013 and 2014 by officers and engineers from the Chilean Army Military Technical Academy, oriented both to the structure it has and to the information and usefulness it presents.

Key words: Condition based maintenance - predictive maintenance - operational availability - real time.

## Introducción

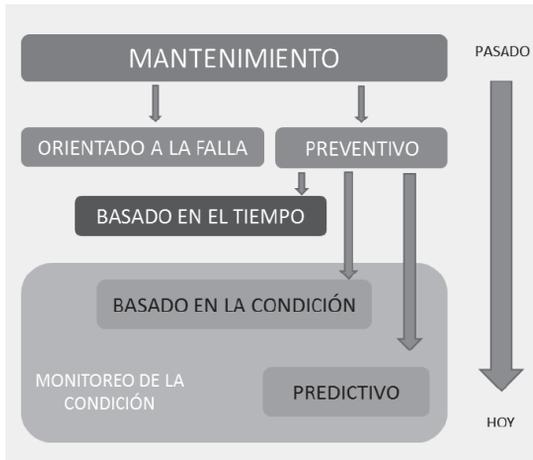
La necesidad de contar con niveles mínimos de disponibilidad operacional dentro de una fuerza terrestre que desarrolla sus actividades de entrenamiento y, eventualmente, en combate, requiere la aplicación de un enfoque evolutivo para la realización del mantenimiento a dichos sistemas de armas.

En una primera fase, el mantenimiento comienza con acciones orientadas a la solución de fallas ocurridas en componentes de los sistemas (mantenimiento de tipo recuperativo y nivel básico), para proseguir con mantenimientos programados en el tiempo, basados en criterios como horas de servicio, tiempo desde el ultimo mantenimiento y otros, sumado a las acciones desarrolladas por los usuarios, a través de inspecciones visuales u otras en los sistemas (mantenimiento de tipo preventivo y nivel conservativo - inspectivo).

La evolución de la manera en la que se realiza el mantenimiento ha llevado al uso intensivo de tecnologías para la detección temprana de anomalías (en tiempo real) y la predicción de comportamientos fuera de los parámetros considerados “normales” de los sistemas de armas, requiriendo la integración de disciplinas ingenieriles como la mecánica, electrónica, informática y otras. Es así como en la Figura 1 se muestra la evolución del mantenimiento a lo largo del tiempo.

30

Figura 1.  
Diagrama de historia del mantenimiento<sup>1</sup>



Fuente: <http://www.siemens.com>.

<sup>1</sup> Siemens, “A Short Story of Maintenance”, año 2014: “Energy efficiency - through predictive maintenance”. [Fecha de consulta 20.12.2015] <http://w3.siemens.com/mcms/topics/en/siplus/condition-monitoring/pages/default.aspx#content>

Dada la evolución descrita anteriormente, varios ejércitos han aplicado diversas técnicas para enfrentar la problemática del mantenimiento, ya sea basada en la condición (considerada como corto plazo) y en la predicción de fallas (estimada como mediano y largo plazo).

A continuación, se detalla el sistema diseñado por el Ejército de los Estados Unidos de América, basado en esta filosofía, como también los avances en el tema que el Ejército de Chile ha logrado en esta área de interés fundamental para el sostenimiento de la Fuerza Terrestre.

## Sistema predictivo de fallas del Ejército de EE.UU.

El mantenimiento predictivo corresponde a un nivel de mantenimiento que busca adelantarse, en el tiempo u otra unidad de medición, a una falla que afecte funcionalmente a un activo bélico, como una forma de generar excesos de gastos en mantenimientos recuperativos básicos (reparación de fallas ya existentes) y aumentar la disponibilidad operacional.<sup>2</sup>

El Ejército de EE.UU. desarrolló un prototipo de un sistema de diagnóstico y pronóstico de fallas para el motor turbina AGT1500 del tanque M-1 A1 y A2 Abrams, a través del uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA), algoritmos basados en reglas y análisis estadístico de regresión para la predicción.<sup>3</sup>

El prototipo, en una fase inicial de desarrollo en laboratorio, recibió el nombre de TEDANN (Turbine Engine Diagnostic using Artificial Neural Networks), teniendo como objetivo la adquisición de datos en tiempo real (hardware), para ser procesados y permitir el monitoreo del estado mecánico del motor y predecir alguna anomalía existente (software).

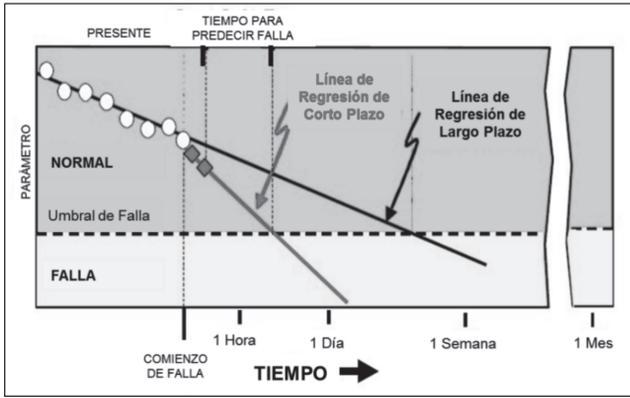
La lógica de funcionamiento del sistema predictivo TEDANN (posteriormente denominado REDI – PRO<sup>4</sup>) se basa en que la degradación de un activo es lineal desde el punto de vista estadístico, siguiendo una pendiente determinada en función a la naturaleza del mismo, es decir, una línea de regresión de largo plazo (normalmente es cercana a ser horizontal).

<sup>2</sup> Disponibilidad Operacional se define como la probabilidad de que un activo bélico que ha sido objeto de mantenimiento, esté en condiciones de ser empleado cuando sea requerido.

<sup>3</sup> Embedded Prognostics Health Monitoring; Frank Greitzer y Ronald Pawlowski.

<sup>4</sup> REDI – PRO: Real time Engine Diagnostics – Prognostics, es decir, Diagnóstico y pronóstico del grupo motopropulsor en tiempo real.

Figura 2.  
Diagrama de predicción del sistema REDI – PRO



Fuente: *Embedded Prognostics Health Monitoring*; Frank Greitzer y Ronald Pawlowski.

32

El problema se observa cuando ocurre algún evento (que puede dar origen a una falla), que lleva al sistema a una degradación acelerada, representada por una línea de regresión de corto plazo (recta con pendiente más vertical o inclinada que aquella de largo plazo), hasta que dicha falla se convierte en funcional<sup>5</sup> y deja fuera de servicio al sistema (intersección recta roja con línea horizontal “Umbral de Falla”).

Por lo tanto, el tiempo que transcurre entre que se detectó el primer síntoma y la ocurrencia de la falla funcional, es el tiempo para realizar la predicción de la falla, siendo el objetivo de REDI – PRO pronosticar la ocurrencia de la futura falla, bajo un intervalo de confianza<sup>6</sup> determinado (Figura 2).

El sistema REDI – PRO fue sometido a pruebas de validación en tanques M-1 Abrams de la Guardia Nacional de EE.UU., pudiéndose comprobar su correcto funcionamiento al indicar, con 4 horas de anticipación, una falla en el sistema de admisión de aire para la combustión del motor – turbina.

Finalmente, el proyecto TEDANN / REDI – PRO, no se llevó a ejecución en su fase de producción, debido a la intención del Ejército de EE.UU. de cambiar

<sup>5</sup> Se refiere a que la falla afecta el normal comportamiento de algún componente o subsistema, en relación a la función para la cual fue diseñada.

<sup>6</sup> Intervalo de confianza: Corresponde a un par o grupo de valores entre los cuales se espera encontrar un número, dado un nivel de confianza, medido en porcentaje. Es decir, para un intervalo de confianza dado, el cual tenga un nivel de confianza de 95%, se espera que de cada 100 datos existentes, en promedio, se presenten 95 datos al interior del intervalo ya mencionado.

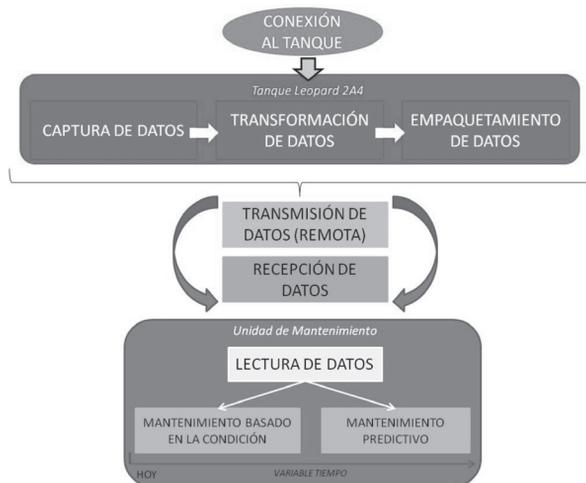
los motores de los futuros tanques M-1 Abrams desde el modelo de motor turbina ATG1500 al modelo de motor Diesel tradicional LV100, y por el alto costo de modificar los modelos antiguos de turbina AGT1500 al estándar de turbina utilizado en el desarrollo del proyecto.

## Sistema de mantenimiento basado en la condición Leopard 2A4

La Academia Politécnica Militar, basada en la experiencia del Ejército de EE.UU. y en la evolución de las estrategias de mantenimiento a nivel mundial, desarrolló un sistema de mantenimiento basado en la condición y de predicción de fallas para el tanque Leopard 2 A4, constituyendo una primera aproximación al mantenimiento de tipo preventivo y nivel predictivo realizado en la Institución.

En primera instancia, se identificó el modelo de diseño del sistema de captura y análisis de datos (Figura 3), determinándose que podrían ser utilizados modelos matemáticos avanzados que representaran el comportamiento del grupo motopropulsor del tanque, constituyendo una base predictiva importante para el futuro desarrollo del sistema.

Figura 3.  
Esquema del diseño conceptual del sistema de captura y análisis de datos



Fuente: Elaboración propia.

A base de lo anterior, se determinó que las señales, generadas por sensores internos al tanque, que podrían alimentar de forma satisfactoria al sistema, para

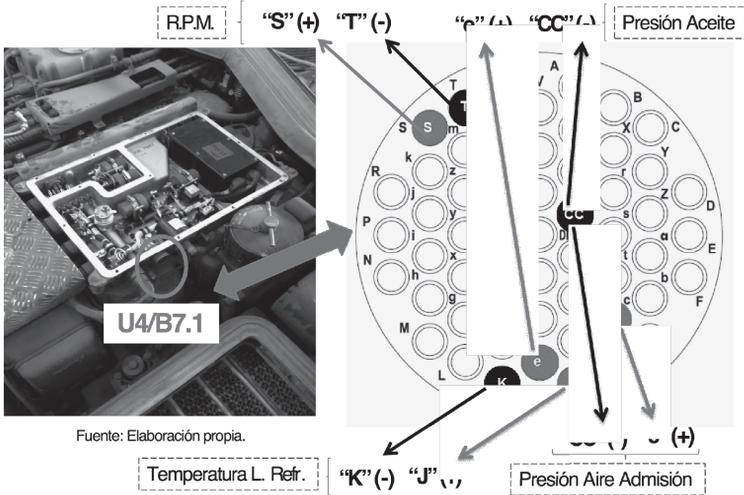
realizar una predicción, son: temperatura de líquido refrigerante, presión de aire de admisión, presión de aceite y revoluciones por minuto (RPM). Las señales obtenidas a través de sensores no disponibles en el tanque debían ser velocidad e inclinación (GPS y sensor de inclinación, respectivamente).

Una vez determinadas las señales y los requerimientos que debería tener el sistema, se procedió a realizar un trabajo arduo de investigación en el conocimiento del grupo motorpropulsor del tanque, a través del estudio de los planos eléctricos y manuales de usuario y mantenimiento del mismo, para determinar los posibles puntos de extracción de datos.

En el proceso ya descrito, se identificó la existencia de una MKA<sup>7</sup>, la cual consiste en una caja metálica ubicada en el grupo motorpropulsor que controla, de forma electrónica mediante la MKE, los procesos del subsistema ya señalado, disponiendo de un conector libre denominado U4/B7.1, en el que era posible obtener las señales provenientes de sensores internos del tanque (Figura 4). La señal de velocidad e inclinación serían obtenidas a través de la instalación de un GPS y un sensor de inclinación, externos al vehículo.

Figura 4.

Esquema de puntos de conexión del conector U4/B7.1 del MKA



Fuente: Elaboración propia.

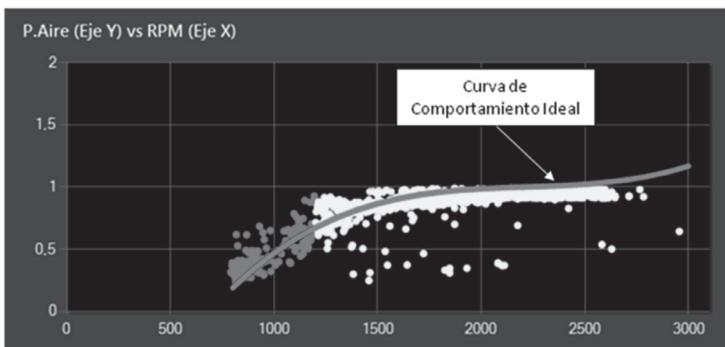
<sup>7</sup> MKA: Instalación de control del motor, la cual sirve para supervisar, controlar y regular el motor. Esta instalación controla el precalentamiento y el arranque del motor, y con el motor en marcha supervisa todas las funciones del mismo que son importantes para su funcionamiento.

La determinación del comportamiento eléctrico de las señales obtenidas por sensores internos al tanque, que permitiera comprender a qué valor de voltaje o frecuencia correspondía cierta presión, temperatura o valor de RPM, fue desarrollado a través de una revisión detallada de manuales del grupo motopropulsor y mediciones experimentales realizadas en un tanque Leopard 2 A4 disponible en el Centro de Mantenimiento Industrial de FAMAE – Talagante.

El conocimiento detallado de las señales a extraer, así como su comportamiento eléctrico y representación de parámetro físico, permitió realizar el desarrollo del equipo electrónico para la captura y transmisión de datos, el cual permitiría la captación de la señal desde el tanque, su transformación a un formato de datos digital y su transmisión, en tiempo real, a un módulo de análisis remoto.

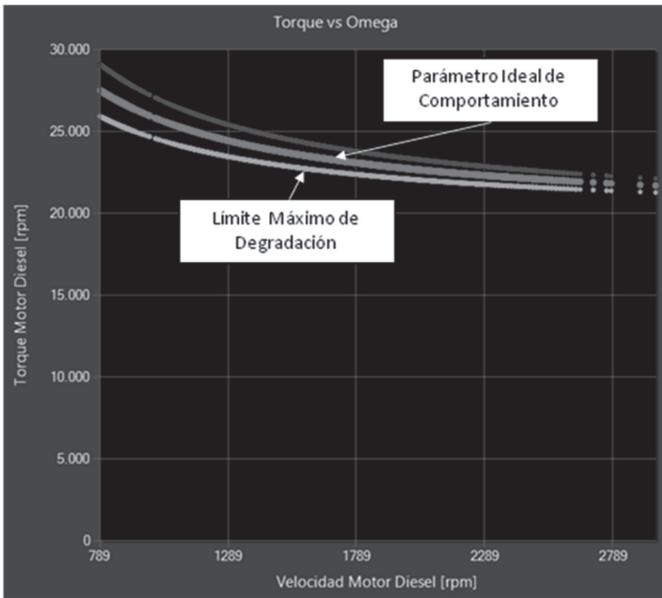
La interpretación de datos se realizó a través de un software diseñado y construido en la Academia Politécnica Militar (ACAPOMIL), el cual permite analizar un tanque mediante un módulo de mantenimiento basado en la condición (con curvas de comportamiento de los parámetros seleccionados para el corto plazo, Figura 5) o con un módulo de predicción de fallas (con gráficos de eficiencia general del motor a lo largo del tiempo para el mediano y largo plazo, Figura 6), junto a una pantalla de presentación estándar (Figura 7).

Figura 5.  
Curva de presión de aire vs RPM del módulo de mantenimiento basado en la condición



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.  
Curvas de Torque vs Omega (RPM) del módulo de mantenimiento predictivo



36

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.  
Pantalla de lectura inicial del módulo de mantenimiento basado en la condición



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el sistema fue evaluado y validado a través de pruebas experimentales desarrolladas en la 1ª Brigada Acorazada “CORACEROS”, ubicada en la ciudad de Arica, con más de 10 horas totales de mediciones, pudiéndose identificar comportamientos de corto plazo que no se especificaban en los manuales técnicos, constituyendo así un producto con gran potencialidad futura de desarrollo y que, a la luz de los resultados, presenta mediciones objetivas y oportunas del comportamiento del tanque.

## Conclusiones y proyecciones

El diseño y fabricación de un sistema de mantenimiento basado en la condición y predicción de fallas, tanto a nivel de dispositivos electrónicos de captura y transmisión, como de reglas de decisión y programas informáticos, para el procesamiento de las señales en tiempo real, constituye un avance tecnológico muy importante para la fuerza, debido a que permitirá, a través de un desarrollo evolutivo en el futuro, conocer la condición de vehículos militares, en tiempo real, y reducir los tiempos de mantenimiento, al evitar que éstos entren en un proceso de mantenimiento recuperativo de nivel básico, con los costos que ello conlleva y aumentar la disponibilidad operacional, dados los factores ya descritos.

Igualmente, existe una proyección de desarrollo de sistemas similares para ser empleados en el ámbito logístico, como alveolos de munición sensorizados, transmisión en tiempo real de niveles de combustible y otros, los cuales permitirán a las unidades de apoyo logístico conocer el estado de los vehículos de combate de la Fuerza Terrestre y ser oportunos y eficientes en el suministro de los rubros correspondientes.

37

## Bibliografía

- Ejército de Chile, *Reglamento de Mantenimiento RDL – 20003*, Santiago, La Reina: División Doctrina, 2013.
- Ejército de Tierra Español, *Manual Técnico del Carro de Combate Leopard 2 A4*, Madrid: Estado Mayor del Ejército – División de Operaciones, 1997.
- Greitzer, Franck, *Life Extension Analysis and Prognostics (LEAP) Architectures*. En Laboratory - Directed Research and Development Annual Report, Fiscal Year 1999. Washington DC – EE.UU.: Pacific Northwest National Laboratory, 1999.

