

# ***Mantenimiento Preventivo Balanceado: Integración de Estándares y Guía del Fabricante para el Mantenimiento de Instalaciones Navales***

*Gerardo X. Pratts Pérez  
Maestría en Ingeniería Gerencial  
Héctor J. Cruzado, PhD, PE  
Escuela Graduada  
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

**Resumen** — *La Marina de los Estados Unidos ordenó al Comando del Sistema de Ingeniería e Instalaciones Navales a realizar el 100% de los elementos de mantenimiento preventivo dentro de sus bases. La directiva de la Marina representa un cambio significativo en el programa de mantenimiento ya requiere reemplazar el mantenimiento basado en la condición del equipo por uno basado en el tiempo, recomendado por los fabricantes de equipos. El estudio analizó el historial de mantenimiento de las unidades dinámicas en los sistemas esenciales para ocho edificios seleccionados dentro de la base naval del Condado de Ventura. La investigación demostró que un programa de mantenimiento que considere elementos prescriptivos y predictivos se convierte en la opción de mayor beneficio costo-operacional.*

**Palabras claves** — *Mantenimiento Preventivo, Mantenimiento Prescriptivo, Mantenimiento Predictivo.*

## **INTRODUCCIÓN**

Las instalaciones militares del Departamento de Defensa de Estados Unidos son activos a largo plazo que requieren mantenimiento por décadas. El mantenimiento de las instalaciones militares asegura que estén en pleno funcionamiento y garantiza la capacidad de los militares para cumplir objetivos estratégicos. Datos obtenidos en estudios recientes indican que la mayoría de las instalaciones federales no gastan los recursos necesarios para mantener las facilidades en buen estado de funcionamiento [1]. Las condiciones actuales afectan la capacidad de la Marina para sustentar la defensa nacional. El mal estado de la infraestructura en las cuatro bases principales de la Marina ha impactado la preparación de la flota de portaaviones y submarinos.

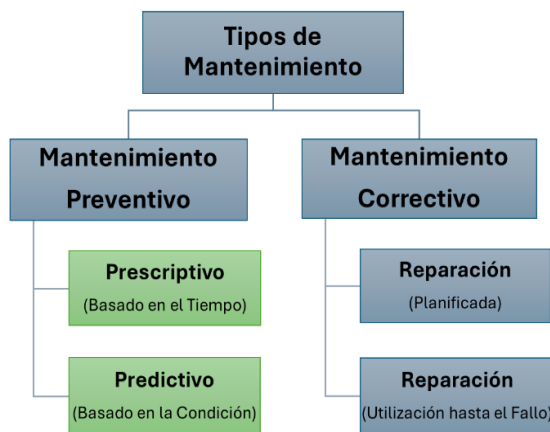
En respuesta a las deficiencias en las facilidades navales, la Marina desarrolló el Plan de Optimización de la Infraestructura y emitió una directiva dirigida al Comando del Sistema de Ingeniería e Instalaciones Navales (NAVFAC) requiriendo que los Departamentos de Obras Publicas realizaran el 100% de los elementos del mantenimiento preventivo. Dicha directiva representa un cambio radical al programa de mantenimiento actual en el cual NAVFAC utiliza las recomendaciones de la guía P-503 para acciones de mantenimiento según la condición del equipo. El tipo de mantenimiento propuesto por la Marina intenta emular las recomendaciones de los fabricantes de equipos y de la industria del mantenimiento de facilidades. Un plan de mantenimiento adecuado garantiza operaciones sostenibles y evita costos innecesarios debido a fallos en los equipos.

El objetivo de este proyecto es presentar un plan de mantenimiento balanceado para las instalaciones de la Marina contrastado los estándares industriales y la guía de mantenimiento planificado (P-503). La investigación estableció un índice de costo-beneficio para todos los equipos analizados considerando su impacto operacional.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

La vida útil de la mayoría de los equipos dentro de los edificios depende de un mantenimiento periódico. Las estrategias de mantenimiento pueden variar según el equipo y estas deben considerar la importancia del activo para el funcionamiento del sistema. Es común que organizaciones decidan elegir en establecer un plan de mantenimiento en sus facilidades el cual considere medidas proactivas y reactivas con el fin de minimizar costos. El enfoque de una organización debe considerar que

tan crítico es el activo para la producción, cuánto costará el mantenimiento, qué impacto tendrá en las operaciones de la organización y que personal se necesitará [2]. Debido a posibles resultados negativos en operaciones militares, el Departamento de la Defensa utiliza un plan de mantenimiento correctivo. La Figura 1 muestra los distintos tipos de mantenimiento preventivo. NAVFAC prefieren el programa de mantenimiento preventivo ya que maximiza la continuidad de las operaciones. El mantenimiento preventivo se divide en dos tipos, mantenimientos prescriptivos (basado en el tiempo) y predictivo (basado en la condición).



**Figura 1**  
**Tipos de Mantenimiento**

Desde el punto de vista conceptual, la aplicación del mantenimiento basado en la condición parece eficaz en comparación con el mantenimiento basado en el tiempo. Esto se debe a que el 99% de las fallas de los equipos están precedidas por ciertos signos, condiciones o indicadores de que dicha falla iba a ocurrir [3].

Un plan de mantenimiento predictivo se centra en monitorear el rendimiento y la condición del equipo durante condiciones normales de operación para reducir la probabilidad de falla [4]. El objetivo del mantenimiento predictivo es el de predecir primero cuando podrían ocurrir fallas y luego prevenirlas mediante un mantenimiento correctivo programado.

Los datos disponibles en la literatura y en las agencias de estadísticas podrían facilitar la realización de estimaciones del costo de

mantenimiento en Estado Unidos junto con el beneficio potencial de adelantar hacia técnicas avanzadas de mantenimiento; sin embargo, las estimaciones de los beneficios de las técnicas avanzadas de mantenimiento requieren suposiciones sólidas que resultarían en un alto nivel de error incalculable [5]. Un análisis de costo con recopilación de datos específicos a un cliente en determinado provee un alto grado de confiabilidad en diferencia a una recomendación general para el mantenimiento preventivo.

## METODOLOGÍA

El proyecto se realizó en las cuatro fases que se discuten a continuación.

### Recopilación de Información

La fase de recopilación de información técnica se basó en la colección de documentos donde se definen los requerimientos de un mantenimiento preventivo de tipo prescriptivo y la creación de una lista de estimados de costos. Los requerimientos son los intervalos de tiempo entre cada intervención de mantenimiento en el equipo. Para obtener la lista de requerimientos se utilizaron varias fuentes de información relacionadas a la industria del mantenimiento preventivo. Entre las fuentes de datos se encuentran varios códigos federales y estatales, asociaciones nacionales e industriales, manuales de fabricantes de equipo e información de proveedores de servicios de mantenimiento. La información de costo se obtuvo en su mayoría de la herramienta de estimados “RSMMeans 2023”. El costo promedio de mantenimiento para cada equipo se obtuvo mediante la generalización de la capacidad del equipo analizado. Se tomó en consideración capacidades medianas y altas de los equipos para obtener un valor promedio de cuanto sería el valor del mantenimiento. La Tabla 1 contiene los requerimientos de tiempo y los costos promedios para el mantenimiento prescriptivo de los equipos considerados en el estudio.

**Tabla 1**  
**Mantenimiento Preventivo (Prescriptivo)**

DESCRIPCION - EQUIPO	Requerimiento (Meses)	Costo (Promedio)
ELECTRICO - Motor Control Center	24	\$970
ELECTRICO - Low Voltage Breakers	36	\$455
ELECTRICO - Transformers	24	\$1,180
ELECTRICO - Generators	12	\$1,725
ELECTRICO - Grounding System	24	\$900
ELECTRICO - Uninterruptible Power Supply	12	\$2,475
FUEGO - Fire Pump	12	\$440
FUEGO - Foam Extinguishing System	6	\$2,050
FUEGO - Air Compressor	3-6	\$640
FUEGO - Fire Alarm System	12	\$1,250
HVAC - Boiler	6	\$1,975
HVAC - Chiller	6-12	\$1,945
HVAC - Cooling Tower	6-12	\$1,275
HVAC - Split System	6-12	\$600
HVAC - Air Handling Units	6-12	\$650
HVAC - Condensing Unit	6-12	\$425
HVAC - Roof Top Unit	6-12	\$850
PLOMERIA - Water Pump	12-24	\$385
PLOMERIA - Water Heater	12-24	\$650
PUERTAS - Roll-up	6	\$250
TRANSPORTE - Elevator	6-12	\$2,625
TRANSPORTE - Crane / Lift	12	\$1,035

### Criterios de Evaluación

Durante la segunda fase del estudio se desarrollaron los criterios de evaluación a los cuales se sometió a prueba la muestra. Los criterios de evaluación fueron los siguientes:

- **Frecuencia del mantenimiento.** Calculó la cantidad de mantenimiento que se realiza en cada equipo considerando su tiempo en servicio.
- **Nivel de mantenimiento.** Determinó los procedimientos de mantenimiento realizados en las unidades seleccionadas. La inspección visual, lubricación y protocolo de pruebas se identificaron como el mantenimiento mínimo requerido.
- **Costos adicionales.** Determinó los gastos de mantenimiento durante un periodo de diez años tomando en consideración los costos adicionales en caso de llegar a la reparación del equipo.

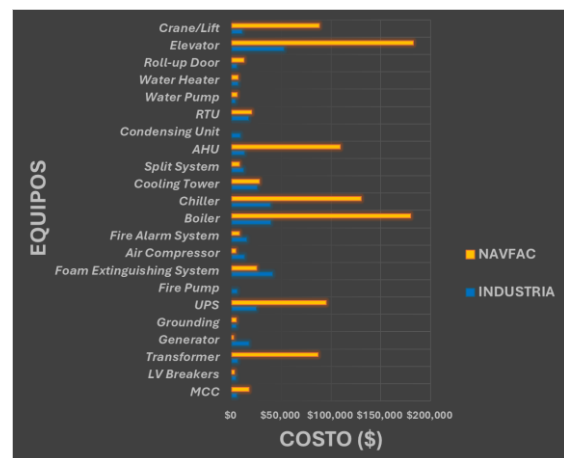
### Selección de Equipos

Los edificios que representaron la muestra están localizados en la Base Naval del Condado de Ventura, California. La muestra incluye ocho facilidades, cuatro de las cuales son de construcción

permanente y cuatro de construcción semipermanente. Las unidades se dividieron en equipos dinámicos y no dinámicos. NAVFAC clasifica los equipos como “dinámicos” si reciben mantenimiento una vez cada cinco años o más, mientras que los clasifica como “no dinámicos” si reciben mantenimiento cada cinco años o más. Dado que el remplazo de unidades es la solución de mantenimiento más común, durante nuestro estudio no se consideraron equipos “no dinámicos”. Finalmente, los equipos dinámicos se dividieron en seis grupos de sistema de soporte. Los sistemas de soporte fueron los siguientes: Sistema eléctrico, Sistema de protección contra incendios, Sistema de aire acondicionado, Plomería, Puertas y Sistema de transporte

### Evaluación de Parámetros

El historial de mantenimiento de los edificios seleccionados se examinó durante la evaluación de parámetros. La base de datos MAXIMO es utilizada por NAVFAC para almacenar información sobre todos los equipos, tanto dinámicos como no dinámicos. La información de la plataforma MAXIMO ayudó a analizar cada equipo según los criterios de evaluación. La Figura 2 presenta una gráfica de costos en la cual se utilizó la información de MAXIMO para comparar el mantenimiento prescriptivo con el mantenimiento predictivo durante un periodo de diez años.



**Figura 2**  
**Costo del Mantenimiento Preventivo (10 años)**

## RESULTADOS

En base a los resultados del análisis económico, el cual compara ambos tipos de mantenimiento preventivo, se construyó un plan de mantenimiento balanceado. La Tabla 2 presenta el plan de mantenimiento preventivo balanceado el cual incluye el nivel de intervención mínimo para el mantenimiento y los intervalos de tiempos entre cada intervención.

Tabla 2  
Plan de Mantenimiento Preventivo Balanceado

EQUIPO	MANTENIMIENTO	TIEMPO
MCC	INSPECCION VISUAL, PRUEBAS ELECTRICAS Y LIMPIEZA	24 meses
LV Breakers	INSPECCION VISUAL, PRUEBAS ELECTRICAS Y LIMPIEZA	36 meses
Transformers	INSPECCION VISUAL Y PRUEBAS ELECTRICAS	24 meses
Generators	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y PRUEBA OPERACIONAL	24 meses
Grounding System	INSPECCION VISUAL Y PRUEBAS ELECTRICAS	36 meses
UPS	INSPECCION VISUAL Y PRUEBAS ELECTRICAS	12 meses
Fire Pump	INSPECCION VISUAL/MECANICA	12 meses
Foam Extinguishing System	INSPECCION VISUAL/MECANICA	12 meses
Air Compressor	INSPECCION VISUAL/MECANICA	24 meses
Fire Alarm System	INSPECCION VISUAL Y PRUEBA OPERACIONAL	12 meses
Boiler	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y PRUEBA OPERACIONAL	6 meses
Chiller	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y PRUEBA OPERACIONAL	6-12 meses
Cooling Tower	INSPECCION VISUAL/MECANICA	6-12 meses
Split System	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y LIMPIEZA	24 meses
AHU	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y PRUEBA OPERACIONAL	6-12 meses
Condensing Unit	INSPECCION VISUAL/MECANICA	24 meses
Roof Top Unit	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y LIMPIEZA	6-12 meses
Water Pump	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y PRUEBA OPERACIONAL	12-24 meses
Water Heater	INSPECCION VISUAL/MECANICA	24 meses
Roll-up door	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y PRUEBA OPERACIONAL	6 meses
Elevator	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y PRUEBA OPERACIONAL	6-12 meses
Crane / Lift	INSPECCION VISUAL/MECANICA Y PRUEBA OPERACIONAL	12 meses

## CONCLUSIÓN

Comprender las implicaciones económicas y operacionales de los resultados de la investigación

ayuda a planificar el mantenimiento de las facilidades a largo plazo. Con el fin de establecer un programa de mantenimiento preventivo sostenible, NAVFAC utilizará el estudio para determinar que iniciativas de mantenimiento tienen la mayor probabilidad de generar retornos positivos sobre la inversión. Para calcular el impacto económico, se utilizó (1) y (2) para formular la Relación Costo-Beneficio, en donde el costo del mantenimiento basado en la condición del equipo (CbM) se compara con el costo del mantenimiento basado en el tiempo (TbM) y se obtiene una razón del costo del mantenimiento total (TCM) para el equipo en específico.

$$\text{Beneficio Total (TB)} = \text{CbM} - \text{TbM} \quad (1)$$

$$\text{Costo - Beneficio} = \text{TB} \div \text{TCM} \quad (2)$$

La Figura 3 presenta la Matriz de Riesgos utilizada para obtener el impacto operacional de cada equipo. La Matriz de Riesgos mide la probabilidad y la severidad de cada componente de la operación para evaluar los riesgos relacionados con las operaciones navales.

Matriz de Evaluación de Riesgos		PROBABILIDAD					
		Frecuencia					
		Frecuente	Probable	Ocasional	Rara vez	Improbable	
SEVERIDAD	Efecto	Catastrófico	ALTO	ALTO	MEDIO-ALTO	MEDIO-ALTO	MEDIO
	Critico	ALTO	MEDIO-ALTO	MEDIO-ALTO	MEDIO	BAJO	
	Moderado	MEDIO-ALTO	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO	
	Despreciable	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	

Figura 3  
Matriz de Evaluación de Riesgos

La Tabla 3 contiene los resultados del análisis de impacto económico y operacional aplicando el programa de mantenimiento preventivo balanceado en los edificios de la Marina que fueron seleccionados. Los resultados demuestran que para un programa de mantenimiento preventivo sea eficiente, dicho plan debe tener un balance de elementos prescriptivos y predictivos.

**Tabla 3**  
**Análisis de Impacto Económico y Operacional**

EQUIPO	RELACION Costo-Beneficio	IMPACTO OPERACIONAL
MCC	57% - INDUSTRIA	MEDIO - ALTO
LV Breakers	21% - P503	MEDIO
Transformers	87% - INDUSTRIA	ALTO
Generators	82% - P503	MEDIO
Grounding System	0%	BAJO
UPS	59% - INDUSTRIA	MEDIO - ALTO
Fire Pump	100% - P503	ALTO
Foam Extinguishing System	24% - P503	ALTO
Air Compressor	51% - P503	MEDIO
Fire Alarm System	32% - P503	ALTO
Boiler	64% - INDUSTRIA	ALTO
Chiller	54% - INDUSTRIA	ALTO
Cooling Tower	5% - INDUSTRIA	MEDIO - ALTO
Split System	21% - P503	MEDIO
AHU	79% - INDUSTRIA	MEDIO
Condensing Unit	100% - P503	MEDIO
Roof Top Unit	9% - INDUSTRIA	ALTO
Water Pump	16% - INDUSTRIA	MEDIO - ALTO
Water Heater	2% - P503	MEDIO
Roll-up door	42% - INDUSTRIA	MEDIO - ALTO
Elevator	55% - INDUSTRIA	BAJO
Crane / Lift	79% - INDUSTRIA	MEDIO

## RECOMENDACIÓN

La investigación llevada a cabo en los ocho edificios de la Base Naval de Ventura respalda la idea de que el mantenimiento preventivo generará beneficios económicos y operacionales efectivos. Durante el estudio se descubrió que otros factores como el entorno, la accesibilidad al sector industrial y económico, etc., tienen un impacto en los requerimientos de mantenimiento y los costos. La identificación de un patrón de averías en equipos en el exterior de los edificios es un ejemplo de esto. La ubicación de la instalación militar cerca de la playa de Ventura contribuye al deterioro de los equipos debido a su exposición al salitre. Aunque el hallazgo de dichos factores representa un obstáculo al desarrollo de una solución de practica global, nuestro estudio permite que otras organizaciones realicen investigaciones similares y evalúen sus beneficios y desventajas.

## REFERENCIAS

- [1] G.P. Sullivan, R. P. (2010). *Operations and Maintenance Best Practices - A guide to achieving operational efficiency*. U.S. Department of Energy.
- [2] Bidanda, Bopaya M., ed. 2023. "MAINTENANCE." Chap. 51.6 in Maynard's Industrial and Systems Engineering Handbook. 6th ed. New York: McGraw Hill.
- [3] Rosmaini Ahmad, S. K. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance. *Computers and Industrial Engineering*, 135-149.
- [4] Trout, J. (2020, February 25). *Types of Maintenance: A Comparison | Reliable Plant*. Reliable Plant. Available: <https://www.reliableplant.com/types-of-maintenance-31812>
- [5] Thomas, D. S. (2018). *The Costs and Benefits of Advanced Maintenance in Manufacturing*. unk: National Institute of Standards and Technology, Department of Commerce.