

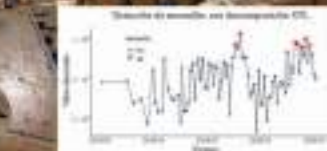


EJÉRCITO DE CHILE
ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR



Boletín Científico Tecnológico

Nº25



2020 - 2021

ISSN 0718-1191
ISSN 2452-607X

EJÉRCITO DE CHILE
DIVISIÓN EDUCACIÓN
Academia Politécnica Militar

Boletín Científico-Tecnológico N°25

2020-2021



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

El Boletín Científico Tecnológico es una publicación oficial de la Academia Politécnica Militar, de periodicidad anual, cuyo sistema de arbitraje es de doble ciego.

Es una instancia de reflexión académica que ofrece su estructura a profesionales, mundo académico, estudiantes, investigadores, docentes y, en general, a todos los lectores y personas interesadas en el conocimiento científico-tecnológico.

Estas páginas les insta a compartir con el solo espíritu de conocer los distintos logros académicos alcanzados en pos de la investigación y la ciencia.

Su **MISIÓN** es constituir un espacio académico para la difusión de investigaciones tanto civiles como militares que versan sobre el desarrollo tecnológico y la investigación científica en el ámbito de la defensa.

Como **VISIÓN**, el Boletín Científico-Tecnológico busca ser un referente nacional en las áreas de las tecnologías de la Defensa y de la reflexión académica al cumplirse el centenario de la Academia Politécnica Militar.

Editor responsable:

Pedro Zamanillo Gálvez

El Boletín Científico Tecnológico está registrado bajo el ISSN 0718-1191 (versión impresa), 2452-607X (versión en línea).

Dirección web: www.boletincientifico.cl

Dirección postal: Avda. Valenzuela Llanos 623, La Reina, Santiago, Chile. Teléfono (562) 226683656.

Todos los artículos son responsabilidad de sus autores y no reflejan ni comprometen la opinión de la Academia Politécnica Militar ni del Ejército de Chile.

El Consejo Editorial se reserva el derecho de publicar o rechazar los artículos que no observen las normas editoriales del Boletín.

Publicada en Santiago de Chile, julio de 2021.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional.



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO
N°25, 2020-2021. ISSN 0718-1191 (VERSIÓN IMPRESA)
ISSN 2452-607X (VERSIÓN DIGITAL)

Presidente

José Manuel Llanos Acevedo

Oficial de Ejército del arma de Telecomunicaciones. Ingeniero Politécnico Militar, mención comunicaciones, Academia Politécnica Militar del Ejército de Chile. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención en Tecnologías de Sistemas de Mando y Control, Academia Politécnica Militar.
Magíster en Planificación y Gestión en Riesgos de Desastres, Academia de Guerra. Subdirector de la Academia Politécnica Militar, Chile.

COMITÉ ACADÉMICO

Juan Sepulveda Salas

Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Santiago de Chile.
Master of Science, Industrial Engineering, The University of Tennessee – Knoxville, Estados Unidos.
PhD, Engineering Science, The University of Tennessee – Knoxville, Estados Unidos.
Académico en la Universidad de Santiago de Chile.

Felisa Margarita Córdova

Ingeniero Civil Electricista, Universidad de Santiago de Chile.
D.E.A. Electronique, Université Paris XI, Francia.
DocteurIngénieur, Electronique, Université Paris XI, Francia.
Directora Escuela Ingeniería en Universidad Finis Terrae, Santiago, Chile.

Oscar Bustos Carrasco

Ingeniero politécnico Militar mención en Armamento, Academia Politécnica Militar. Santiago, Chile.
Magíster en Docencia de Nivel Superior, Universidad de Los Andes, Chile.
Jefe de la División de Desarrollo Tecnológico e Industria en la Subsecretaría de Defensa del Ministerio de Defensa, Santiago, Chile.

Sergio Quijada Figueroa

Ingeniero Politécnico Militar mención en Geografía, Academia Politécnica Militar. Santiago, Chile.
Master en Ciencias, Universidad Central de Florida, Estados Unidos.
PhD Modelación y Simulación, Universidad Central de Florida, Estados Unidos.
Académico de la Universidad de Los Andes, Santiago, Chile.

Héctor Gaete Fica

Ingeniero Politécnico Militar mención Mecánica, Academia Politécnica Militar. Santiago, Chile.
MSc, PhD e investigador invitado en desarrollo de capacidades militares, Universidad de Cranfield, Reino Unido.

Aquiles Sepúlveda Osses

Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile.
Doctor-Ingeniero, Universidad de París VI, Francia.
Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.

Orlando Durán Acevedo

Ingeniero en Ejecución Industrial, Universidad de Santiago de Chile.
Master en Ingeniería Mecánica, Universidad Estatal de Campinas, Brasil.
Doctor en Ingeniería, Universidad Estatal de Campinas, Brasil.
Profesor Titular de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile.

Yorma Sepúlveda Paredes

Químico, Universidad de Santiago de Chile.
Magíster en Ciencias de los Materiales, Universidad de Santiago de Chile.
Investigadora de la Academia Politécnica Militar. Santiago, Chile.

Alejandro Guzmán Dálbora

Ingeniero Comercial de la Universidad de Valparaíso, Chile.
MBA en Finanzas Universidad de Chile, Santiago.
Actualmente es Consultor en Leverage Consultores, Chile.
MBA en Finanzas Universidad de Chile, Santiago.
Consultor en Leverage Consultores, Chile.

César Morales Verdejo

Químico, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
Doctor en Química, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
Postdoctoral Researcher, Argonne National Laboratory, Illinois, Estados Unidos.
Director Programa de Doctorado en Ciencias con mención en Materiales Funcionales, UBO, Santiago, Chile
Académico de la Universidad Bernardo O'Higgins (UBO), Santiago, Chile.

CONSEJO EDITORIAL

Editor Responsable

Pedro Zamanillo Gálvez

Teniente Coronel

Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas TICs mención en Informática y Computación, Academia Politécnica Militar. Santiago, Chile.

Jefe del Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de la Academia Politécnica Militar, Santiago, Chile.

Coeditor

Johann Golsworthy Miranda

Administrador Público, Universidad Santiago de Chile.

Magíster en Ciencias Militares mención en Gestión Estratégica, Academia de Guerra. Santiago, Chile.

Diplomado en Edición de Revistas Científicas en Línea. Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales, Buenos Aires, Argentina.

Encargado de Planificación Académica de Postgrado y Educación Continua, Academia Politécnica Militar. Santiago, Chile.

Comunicaciones

Daniela Varas Gaete

Relacionadora Pública Corporativa, Instituto Profesional AIEP. Santiago, Chile.

Diplomado en Metodología de la Investigación, Universidad Bernardo O'Higgins. Santiago, Chile.

Encargada de Comunicaciones de la Academia Politécnica Militar. Santiago, Chile.

SUMARIO

	Pág.
Editorial	8
Desarrollo de sistema inteligente para la generación de escenarios de mantenimiento	9
Autores: Sr. Diabb L. Zegpi Delgado y TCL. Héctor R. Reyes Campaña	
Determinación de la etapa de vida de un activo mediante el empleo de la distribución de Weibull y la curva de Davies y sus respectivas acciones de mantenimiento	25
Autor: TCL. Pablo De la Maza Aguayo	
Modelo de localización y ruteo de vehículos en dos fases para el abastecimiento logístico en el campo de batalla	45
Autor: MAY. Luis San Martín Riveros.	
Diseño preliminar de un sistema de traslado para cañones de recambio del armamento secundario y fusiles de la tripulación del tanque Leopard 2a4	70
Autor: MAY. Cristián Barra Mora	
Sistema de visualización virtual del espacio de batalla ares (augmented reality sandtable) del Ejército de los Estados Unidos (US Army)	88
TCL. Alejandro Gómez Abutridy y TCL. Sergio Iturriaga Delgado	
Procedimiento editorial	101

EDITORIAL

Por vigésimo quinto año consecutivo, la Academia Politécnica Militar (ACAPOMIL) tiene el agrado de presentar un nuevo número del Boletín Científico-Tecnológico, revista que refleja el trabajo académico, tanto de civiles como militares, de diversas unidades del Ejército distribuidas a la largo de Chile. En esta ocasión, este Instituto de formación superior, el cual cumple 95 años de existencia, se presenta ante la comunidad universitaria con una vasta experiencia relativa a la transferencia de conocimientos e integración con la sociedad, de forma de configurarse como una institución en educación referente en investigación e innovación en disciplinas científico-tecnológicas, en miras de contribuir al desarrollo de la industria militar, en particular, y del sector de la defensa en general.

A este respecto, la revista Boletín Científico Tecnológico, se encuentra en un proceso para incorporar mejoras de calidad y visibilidad, siendo una de ellas la incorporación a la base de datos de Revistas Científicas Chilenas, que sin duda ayudará a difundir la presente edición N°25, la cual contiene cinco artículos provenientes de investigaciones que proponen soluciones innovadoras a problemas actuales del Ejército de Chile y la Defensa Nacional. En este ámbito, los temas de estos artículos, desarrollados tanto por Oficiales Ingenieros Politécnicos Militares, como por civiles, constituyen un aporte en las áreas de: mantenimiento, logística, sistemas de visualización virtual, entre otros, los que van en directa mejoría de los actuales Sistemas de Armas con los que cuenta la Institución, dando cuenta de su útil y eficiente rol entre las filas.

En este contexto, al constituirse esta revista como un espacio de difusión académica, no puede dejar de lado temáticas tan trascendentales, que atañen no solo a la contingencia nacional sino que también a la internacional, uno de ellos son los innegables efectos que ha traído el virus COVID-19, y los inquietantes desafíos globales en el ámbito de la ciberdefensa. Desafío tomado por la Academia, al iniciar próximamente la primera versión de un magíster ligado directamente a esta temática.

Finalmente, esperamos que el lector sepa estimar y valorar los aportes aquí presentados, los que se unen a los ya 95 años que lleva la Academia Politécnica Militar al servicio de la ciencia y tecnología para la defensa.

JOSÉ LLANOS ACEVEDO
Coronel
Director de la Academia Politécnica Militar

DESARROLLO DE SISTEMA INTELIGENTE PARA LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE MANTENIMIENTO

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2020

Fecha de aceptación: 29 de febrero de 2021

Sr. Diabb L. Zegpi Delgado.¹
TCL. Héctor R. Reyes Campaña²

Resumen: La División Mantenimiento (DIVMAN) por medio de su Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo (DI2D) se encuentra desarrollando una herramienta que permita generar escenarios de mantenimiento, con una incertidumbre medible, para solucionar problemáticas relacionadas con la demanda de mantenimiento. Este estudio propone un sistema inteligente basado en aprendizaje automático para predecir costos de Mantenimiento Recuperativo Básico (MRB) por escenario, donde los datos para el entrenamiento y prueba del modelo son Solicitudes Internas de Compra (SIC) obtenidas del Sistema de Información para la Gestión Logística del Ejército (SIGLE). Se entrenó un modelo mixto para detección de anomalías y predicción de costos, con los algoritmos STL y Random Forests, respectivamente, desarrollados con el lenguaje de programación R. Para complementar la predicción, se ajusta un modelo estocástico con distribución Weibull, el cual simula las condiciones iniciales para la predicción basándose en simulación Monte Carlo. Los resultados son alentadores, porque el sistema inteligente predice escenarios de costos anuales con error estándar equivalente a $\pm 0,02$ veces el costo anual medio de mantenimiento.

Palabras clave: aprendizaje automático, detección de anomalías, mantenimiento recuperativo básico, simulación.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR MAINTENANCE SCENARIOS GENERATION

Abstract: The Maintenance Division (DIVMAN) through its Engineering, Research and Development Department (DI2D) is developing a tool that allows generating maintenance scenarios, with measurable uncertainty, to solve problems related to maintenance demand. This study proposes an intelligent system based on machine learning to predict costs of Basic Recuperative Maintenance (MRB) by scenario, where the data for model training and testing are Internal Purchase Requests (SIC) obtained from the Army's Information System for Logistics Management (SIGLE). A mixed model was trained for anomaly detection and cost prediction, with the STL and Random Forests algorithms, respectively, developed with the R programming language. To complement the prediction, a stochastic model with Weibull distribution is fitted, which simulates the initial conditions for the prediction based on Monte Carlo simulation. The results are that the intelligent system predicts annual cost scenarios with a standard error equal to ± 0.02 times the mean.

KEY WORDS: machine learning, anomaly detection, basic recuperative maintenance, simulation.

¹ Ingeniero Civil Industrial; Ejército de Chile. División de Mantenimiento (DIVMAN). Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo (DI2D). Santiago, Chile. E-mail: diabluis@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1091-1831>

² Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Mecánico. Magíster 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. E-mail: hector.reyes@ejercito.cl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6941-8198>

1. INTRODUCCIÓN

La Jefatura de Mantenimiento (JEFMAN), dependiente de la División de Mantenimiento (DIVMAN), está encargada de gestionar las Solicitudes Internas de Compra (SIC) emitidas por la totalidad de las Unidades de Mantenimiento del Ejército de Chile. La causa raíz de las solicitudes mencionadas es la falla de un activo de defensa, detectada por los operadores de las Unidades Operativas del Ejército. Todas estas fallas componen la categoría de Mantenimiento Recuperativo Básico Conservativo (MRBC). Las SIC son registradas en la plataforma virtual SIGLE, que es el planificador de recursos empresariales (ERP) del Ejército de Chile, cuyo proveedor es Oracle Corp.

La Figura 1 muestra el flujo de las SIC por MRBC, desde que las generan las unidades de mantenimiento, son informadas al escalón superior a través de SIGLE y las recibe la JEFMAN de la DIVMAN. El personal militar de la DIVMAN está encargado de recopilar las SIC en una Ficha de Fundamento del Gasto (FFG), ajustarla al presupuesto fiscal, presentar esta ficha y velar por que las necesidades de mantenimiento recuperativo de las unidades militares sean solventadas.

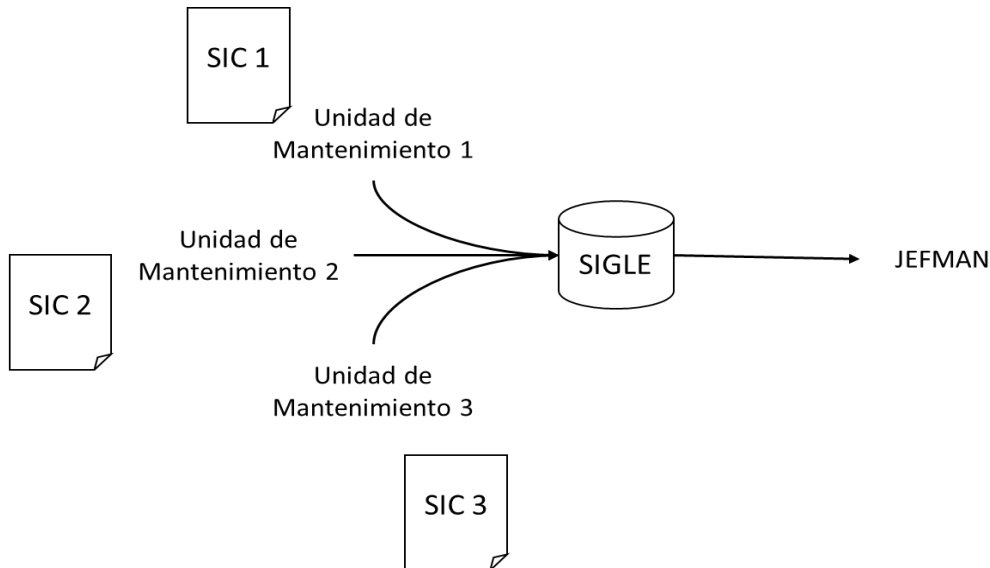


Figura 1: “Diagrama flujo de una SIC por MRBC.”
Fuente: elaboración propia.

El proceso de aprobación de una FFG es un trámite administrativo que puede demorar desde meses hasta años, lo que genera un apremio financiero al interior de la JEFMAN, debido a que se deben costear los requerimientos del presente con los recursos del pasado o, análogamente, los requerimientos de meses o años futuros con los recursos del presente.

La burocracia administrativa obliga a la DIVMAN a anticiparse meses e incluso años a los requerimientos de sus Unidades de Mantenimiento a cargo. La forma tradicional de gestionar múltiples escenarios bajo incertidumbre es mediante el correcto uso de herramientas de ingeniería para el control de gestión, como cartas de control, análisis de sensibilidad y riesgo, o herramientas de estadística clásica y moderna, como análisis de regresión, series de tiempo y estadística bayesiana. Hoy en día, la DIVMAN necesita contar con las herramientas de estadística, clásicas o modernas, para proyectar escenarios de demanda de mantenimiento.

El objetivo de este estudio es proponer una herramienta moderna de predicción para la demanda de MRBC que gestiona la DIVMAN a través de la JEFMAN. Esta herramienta se desarrolla con métodos de aprendizaje automático y es encauzada por la metodología de extracción de conocimiento a partir de bases de datos (KDD). Adicionalmente, esta publicación incluye una revisión bibliográfica que busca obtener información relevante acerca de los enfoques teóricos relacionados al objeto de estudio, de las tendencias y de las perspectivas metodológicas.

1.1. Estado del arte

Las aplicaciones de aprendizaje automático son transversales a todas las áreas del conocimiento, sea salud, mantenimiento, finanzas, entre otras. Los árboles de decisión son modelos de aprendizaje automático de baja complejidad y rápido entrenamiento, cualidad que explotó Tianqi Chen (2016) para introducir los métodos de *ensemble*, dado que combinan predicciones de conjuntos de árboles, obteniendo de esta manera un modelo más robusto y preciso. El principal exponente de los métodos de *ensemble* es *Random Forest* (bosques aleatorios), modelo que se ha vuelto extremadamente popular en la comunidad de practicantes de aprendizaje automático, por su rapidez de entrenamiento, versatilidad para simular multitud de funciones matemáticas, y por su desempeño excepcional, superando a veces a las Redes Neuronales Profundas (DNN).

En 2018, Paolanti y otros investigadores describen una arquitectura de aprendizaje automático para mantenimiento predictivo, basado en el enfoque de conjuntos de árboles. Este enfoque fue probado en la industria, desarrollando una colección de datos y un sistema de análisis con aprendizaje automático. Los resultados del análisis fueron comparados con el desempeño de la herramienta de simulación más usada para el mantenimiento predictivo de motores eléctricos, mejorando la confiabilidad del sistema; los datos fueron recolectados por variedad de sensores.

Bosques aleatorios es un poderoso algoritmo de machine learning con éxito demostrado. Gong *et al.* (2018) desarrollaron un modelo de regresión basado en bosques aleatorios (RFR) para estimar el índice de aspereza internacional (IRI) de pavimentos

flexibles, a partir de medidas de desgaste, tráfico, clima, mantenimiento y datos de estructura. El desempeño del modelo RFR fue comparado con el de un modelo de Regresión Lineal con regularización. Los resultados revelaron que el modelo RFR superó significativamente al modelo de regresión lineal, con un coeficiente de determinación mayor que 0,95 en ambos conjuntos, de entrenamiento y prueba.

Otro algoritmo poderoso es eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), perteneciente a la familia de métodos de ensemble, cuya arquitectura es similar al modelo de bosques aleatorios, porque utiliza diversos modelos menos sofisticados para resolver una tarea, agrupa sus predicciones y crea una nueva predicción a partir de éstas. XGBoost tiene la ventaja de no asumir determinación ni independencia, y claramente puede manejar gran cantidad de variables importantes para el mantenimiento (Lim & Chi, 2019).

En la revisión de Bojer y Meldgaard (2020), confirman que en las competencias de pronósticos de Kaggle (plataforma de competencias de inteligencia artificial), los modelos de ensemble (XGBoost, bosques aleatorios y sus variantes) que usan aprendizaje cruzado tienden a superar a los modelos locales de series de tiempo, y que tanto XGBoost como las redes neuronales son métodos poderosos para producir pronósticos.

De acuerdo a Boussabaine y Kirkham (2004), la capacidad de predecir con exactitud los costos de mantenimiento puede proveer una herramienta esencial para la gestión durante las etapas operacionales de un negocio. Los investigadores recopilaron técnicas y métricas usadas para predecir costos, con el objeto de proponer un enfoque innovador, basado en simulación, para el modelamiento de los costos de mantenimiento de los edificios deportivos de localidades del Reino Unido. El estudio presenta una comparación entre métodos de regresión lineal simple y regresión no lineal múltiple, análisis de falla integrada, modelos de teoría de lógica difusa y técnicas de inteligencia artificial. Estas últimas superaron el desempeño de los modelos predecesores, pero prevaleció el problema de determinar la incertidumbre del modelo. Con el fin de superar el obstáculo mencionado, se aplicaron modelos Markovianos, obteniendo estimaciones satisfactorias de la incertidumbre, pero estos modelos fallan al no incorporar específicamente los costos de mantenimiento, lo que es un factor determinante para la toma de decisiones.

Una forma de incorporar los costos de mantenimiento es usando algoritmos de aprendizaje automático. Ibrahim y Khatib (2017) exploraron los beneficios de utilizar modelos de bosques aleatorios y los criterios de impureza para discriminar atributos importantes. Sin embargo, la omisión de hiperparámetros en su explicación denota que su trabajo no considera los avances más recientes en optimización por métodos de *grid search*. Un año después (2018), Quiroz et al. proponen un nuevo enfoque para diagnosticar fallas en barras de rotor usando Random Forests. Como resultado, obtuvieron métricas de

precisión excepcionales, de 98,8% y 98,4% para dos modelos con diferentes atributos, calibrados de acuerdo al criterio de impureza de Gini.

Ninguno de los trabajos mencionados presenta un caso de uso de técnicas de aprendizaje automático/simulación a la industria militar. Este hecho permite a Sharma, Kulkarni y Yadav (2017) introducir una novedad: “modificar el proceso de simulación y optimización con algoritmos genéticos para abordar el *modus operandi* exacto que emplea el Ejército para desarrollar equipamiento para la paz, ejercicios de entrenamiento y la guerra, separadamente.” (Sharma, Kulkarni & Yadav, 2017). Los autores se refieren a predecir la necesidad por piezas de repuesto como una tarea difícil, pero abordable mediante la utilización de calendarios de períodos de uso de los activos de defensa. Con base a estos períodos, generaron escenarios de duración variable, en los que distintas piezas de repuesto eran requeridas. Para la simulación de escenarios, asumieron que la falla de los componentes sigue una distribución Weibull de dos parámetros. De esta manera pudieron calcular la confiabilidad del sistema en función del tiempo de operatividad de los activos. Los autores concluyen que el mejor enfoque para abordar el problema de mantenimiento de activos militares es selectivo, por los períodos de uso intenso seguidos de inactividad que puede sufrir cada activo individual.

Para el caso particular de la DIVMAN y este estudio, se recogen e implementan las ideas de Cardoso *et al.* (2008), debido a la necesidad de generar gigabytes de datos de forma eficiente. Además, se implementó el flujo de trabajo secuencial de la forma simulación-predicción, mejorando la eficiencia de la memoria RAM. El uso de optimización con algoritmos genéticos de Sharma, Kulkarni y Yadav es indicio de carencia de métodos especializados para la optimización de funciones de mantenimiento en la industria militar, dado que “hay evidencia de que los algoritmos genéticos no garantizan una solución óptima” (Sivanandam & Deepa, 2008). Este estudio propone resolver la simulación de escenarios de mantenimiento mediante la conexión en serie de un modelo de simulación Monte Carlo y un modelo regresor de bosques aleatorios.

2. DESARROLLO

El sistema inteligente en cuestión se compone por dos modelos complementarios: un modelo de predicción y un modelo de simulación. Como muestra la Figura 2, el modelo de simulación genera datos de escenarios de mantenimiento y es ajustable de acuerdo al criterio de un usuario experto; el modelo de predicción utiliza estos escenarios como *inputs* y produce predicciones de costos por escenario.

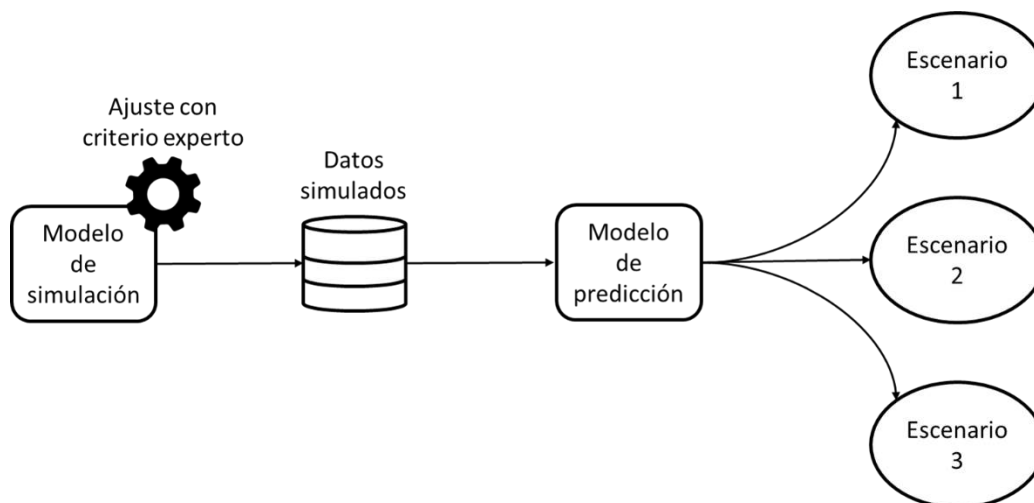


Figura 2: "Integración del sistema inteligente."

Fuente: elaboración propia.

Ambos modelos (simulación y predicción) se ajustan a los datos de SIC obtenidas de SIGLE, por ende, se comienza mostrando la estructura de los datos. Después, los datos son preparados para la minería de datos. Posteriormente, se procede a aplicar técnicas de *selección y transformación de atributos*, *afinación de hiperparámetros* y aprendizaje automático en un proceso iterativo, hasta alcanzar un desempeño satisfactorio (Figura 3). Por último, se desarrolla un modelo de simulación con Monte Carlo, en el que se establecen las condiciones iniciales para generar escenarios de MRBC. La composición del sistema inteligente consiste en la integración en serie de los dos modelos, tal que se predicen los costos de escenarios generados bajo condiciones conocidas y controladas. Este método es eficiente porque resume los escenarios simulados en una predicción, liberando el espacio en la memoria RAM que ocupan las simulaciones. Además, las simulaciones son conducidas con computación paralela en una computadora cuyo procesador tiene 8 núcleos, lo que reduce los tiempos de cómputo hasta por un factor de 3.

La metodología empleada es el proceso *Knowledge Discovery from Databases* (KDD), para extraer conocimiento de conjuntos de datos.

Análisis de datos, gráficos y aprendizaje automático se desarrollan en el lenguaje de programación R en su versión 4.0.3 (10-10-2020) y el IDE RStudio versión 1.3.1093. Los paquetes que se utilizan son: tidyverse; tidymodels; lubridate; scales; patchwork; univariateML; furrr; janitor; skimr; anomalize.

Debido al carácter confidencial de los datos del Ejército de Chile, las tablas y figuras de esta publicación contendrán datos estimados y ponderados, que permitan demostrar la potencialidad del modelo.

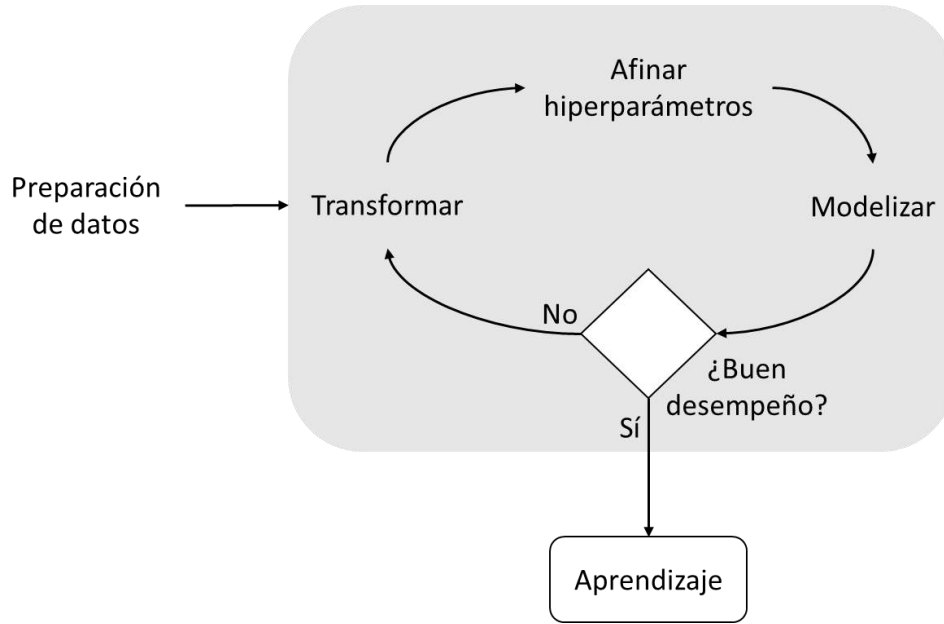


Figura 3: “Proceso iterativo de minería de datos.”
Fuente: elaboración propia.

2.1. Estructura de datos: SIC

SIGLE dispone el reporte de SIC en forma tabular; cada fila es un artículo/servicio que la Unidad Militar solicita, y cada columna es un atributo de la solicitud. La tabla N°1 provee una demostración sintética de los datos.

Fecha	N° SIC	Descripción	Cantidad	Precio unitario (\$)
26-10-2018	161.185	Perno del paquete de resorte	2	25.000
26-10-2018	161.185	Amortiguadores traseros	2	230.000
07-11-2018	162.198	Servicio de alineación vehículo campaña	1	350.000
10-12-2018	166.084	Batería vehicular 12volt 120 ah	2	195.000

Tabla 1: “Ejemplo de reporte SIGLE de SIC.”
Fuente: elaboración propia.

El reporte contiene datos de tipo numéricos, categóricos y fechas. El análisis exploratorio de los datos evidencia errores en los registros, columnas incompletas y otras

características que introducen ruido a los modelos de aprendizaje automático. Por esta razón, es necesario preparar el conjunto de datos.

2.2. Preparación de datos

El tratamiento de los datos de SIC sigue un proceso estándar de limpieza de datos. Las etapas de la limpieza se enumeran a continuación.

- 1) Eliminación de registros y atributos con alta proporción de valores faltantes ($> 60\%$).
- 2) Eliminación de atributos con varianza igual o cercana a cero.
- 3) Eliminación de atributos con información irrelevante.
- 4) Identificación y tratamiento de valores fuera de rango.
- 5) Detección de incoherencias.
- 6) Imputación de valores faltantes con algoritmo *K-Nearest Neighbors* (KNN).

Como resultado de la preparación de datos, se produce un conjunto de datos en formato largo (una fila por observación; cada columna es un atributo), listo para la minería de datos.

2.3. Minería de datos

El proceso iterativo de la minería de datos inicia con la selección de los atributos del conjunto de datos que poseen mayor poder predictivo, reteniéndolos, y se crean nuevos atributos. A esta subetapa de retener y crear atributos suele encontrarse en la literatura como *ingeniería de características*.

Los modelos de aprendizaje automático usualmente trabajan con variables numéricas y no con categóricas. La codificación de las variables categóricas a numéricas produce que el conjunto de datos se reorganice, pasando de formato largo a formato ancho. Esto implica que el número de columnas aumente y el número de filas disminuya.

Una característica interesante para añadir al modelo, es que aprenda a reaccionar ante eventos poco frecuentes, pero de gran impacto, dado que estos eventos contienen información sobre el riesgo sistémico que existe en el mundo real. Un ejemplo de este tipo de eventos es el “estallido social” de octubre del 2019, cuyo impacto se debe a que provocó la movilización de activos de defensa, desembocando en aumentos sustanciales de los costos por mantenimiento recuperativo. Debido a su escasa frecuencia, un modelo de aprendizaje automático robusto no reconoce patrón alguno en los eventos excepcionales o *anomalías*. Para solucionar este problema y extraer información de las anomalías, se procede a detectarlas con el método de descomposición estacional y de tendencia usando regresión local (STL). La Figura 4 ilustra los resultados de la aplicación de la descomposición temporal STL.

Detección de anomalías con descomposición STL

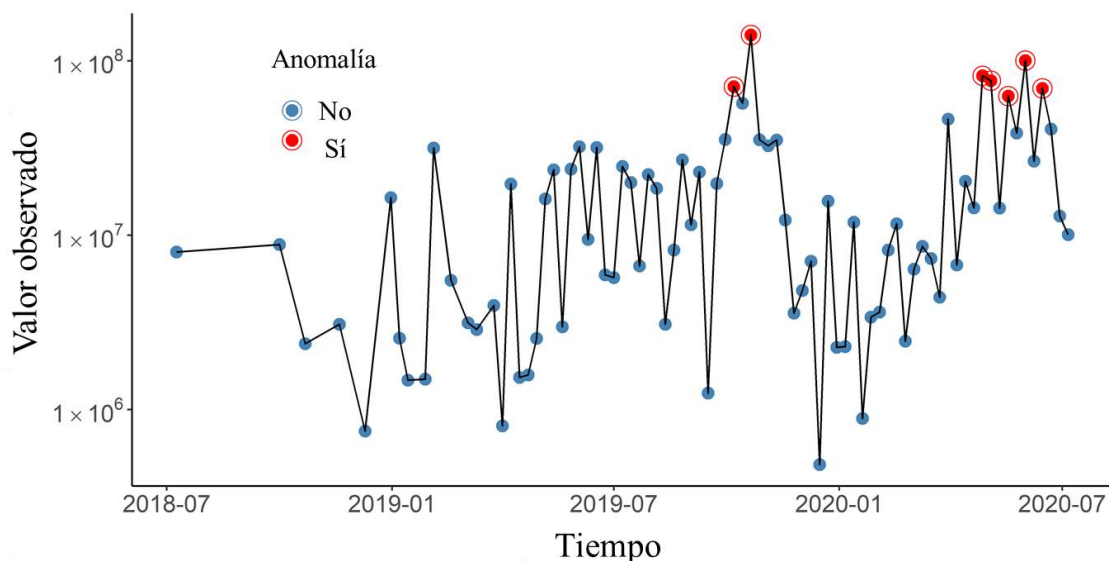


Figura 4: “Detección de anomalías con descomposición temporal STL.”

Fuente: elaboración propia.

Una vez que se estima que el conjunto de datos contiene la información relevante para entrenar a un modelo preciso y robusto, se procede a dividir el conjunto de datos en subconjuntos de entrenamiento y prueba, y ajustar un modelo usando aprendizaje automático al conjunto de entrenamiento. El conjunto de prueba se reserva para evaluar el desempeño del modelo finalizado.

El procedimiento de entrenamiento consiste en generar múltiples combinaciones de hiperparámetros, ajustar k modelos a cada combinación y medir su desempeño individual. El desempeño de una combinación de hiperparámetros es la media de los desempeños individuales. La métrica de desempeño a medir es la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). Mientras menor sea el RMSE, mejor es el ajuste del modelo.

Los hiperparámetros del modelo de bosques aleatorios son:

- Número de árboles de decisión contenidos en el modelo. El valor de este hiperparámetro se fija en 1.000.
- Número de predictores que son muestreados aleatoriamente en cada división cuando se crean los modelos de árbol de decisión (Mtry).
- Cantidad mínima de datos necesarios para que el nodo de un árbol continúe separándose (Min n).

Para afinar los hiperparámetros del modelo de bosques aleatorios se usan métodos de *grid search* para 200 combinaciones de hiperparámetros, y *10-fold cross validation* como

método de remuestreo. Para cada combinación de hiperparámetros, se ajustan 10 modelos, cuyas métricas de desempeño referenciales se ilustran en la Figura 5. Cada punto del gráfico representa el desempeño medio de 10 modelos para una configuración de hiperparámetros determinada. La mejor combinación para el modelo final es el punto más cercano al eje horizontal, es decir, con menor RMSE.

Una vez que la mejor combinación es elegida, corresponde validar el modelo mediante la evaluación de su desempeño en el conjunto de prueba. Se comparan los datos observados del conjunto de prueba con las predicciones del modelo para este mismo conjunto, cometiendo un error de $\pm 7\%$. Dado que no hay precedente en la JEFMAN para efectuar una comparación, el modelo de predicción establece un marco de referencia para trabajos posteriores con aprendizaje automático.

Resultado de afinación de hiperparámetros para modelos de bosques aleatorios

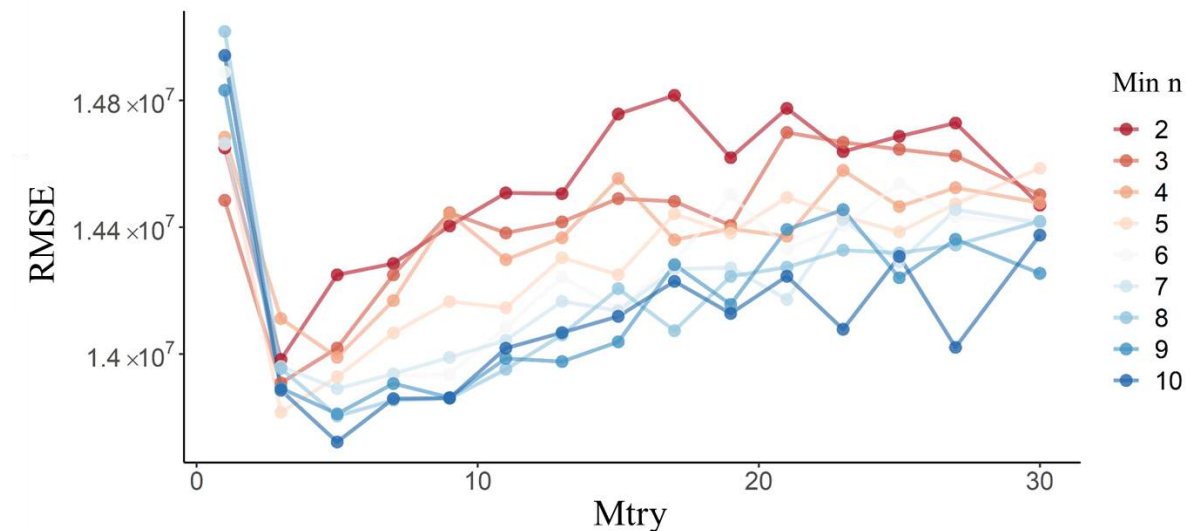


Figura 5: "Ajuste de dos hiperparámetros para Random Forest."
Fuente: elaboración propia.

Para implementar el modelo predictor y producir pronósticos para los costos por MRBC, son necesarios los datos de SIC del período que se desea predecir. Debido a que el reporte SIGLE para períodos futuros todavía no existe, surge la necesidad de una fuente de datos sustituta. Por esta razón, se desarrolla un modelo de simulación Monte Carlo para generar escenarios de mantenimiento.

2.4. Simulación Monte Carlo

Esta etapa del desarrollo consta de dos subetapas: ajuste de un modelo estocástico y análisis de convergencia de la simulación. El modelo de simulación tiene una restricción

importante de carácter computacional: debe simular las mismas variables que usa el modelo de predicción como *input*.

En la Tabla 2 se muestran los 9 mejores ajustes de modelos estocásticos a distribuciones de probabilidad multipropósito. Los parámetros de cada modelo fueron estimados con el *estimador de máxima verosimilitud*. Tanto el Índice de Información de Akaike (AIC) y el Índice de Información Bayesiano (BIC) son interpretaciones diferentes del mismo indicador: la distancia entre el verdadero modelo que subyace en los datos y el modelo propuesto. Aunque existen criterios de información más complejos y específicos, no existe evidencia suficiente de su aplicación a la industria del mantenimiento que justifique su uso. El propósito de esta comparación es elegir el modelo que presente el menor índice.

Modelo	AIC	BIC
<i>Weibull</i>	818,4097	823,1986
<i>Log-normal</i>	820,0192	824,8081
<i>Gamma</i>	820,6250	825,4139
<i>Exponencial</i>	829,5348	831,9292
<i>Weibull inversa</i>	837,9313	842,7202
<i>Gaussiana inversa</i>	838,2192	843,0081
<i>Beta prima</i>	842,4531	847,2420
<i>Gamma inversa</i>	848,3012	853,0901
<i>Rayleigh</i>	1.041,5399	1.043,9343

Tabla 2: "Comparación de ajustes por índice de información."

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los criterios de información AIC y BIC, el modelo que mejor se ajusta a los datos es un modelo Weibull, con parámetros de escala y forma $\alpha = 50,64$ y $\beta = 0,75$, respectivamente. Aun así, las diferencias de los criterios de información son pequeñas entre los dos primeros modelos, Weibull y Log-normal. Por ende, se procede a realizar una comparación gráfica de los ajustes.

La Figura 6 ilustra cómo se ajustan los modelos Weibull y Log-normal a las distribuciones de densidad (A) y densidad acumulada (B) de los datos. En el gráfico A de la

Figura 6 se observa que el modelo Log-normal tiene más curvatura negativa, lo que indica que la cola de la distribución Log-normal es más gruesa que la cola de la distribución Weibull. Si esta última afirmación se correspondiera con el fenómeno de estudio “Cantidad de SIC por semana”, implicaría que el 5% de las semanas habría más de 305 SIC. Sin embargo, la verdadera distribución de los datos indica que el 5% de las semanas presentan más de 194 SIC. Por otra parte, el modelo Weibull se aproxima mucho más a la realidad, indicando que el 5% de las semanas la cantidad de SIC es superior a 218.

El gráfico B sugiere que el modelo Weibull se aproxima mejor a la distribución de densidad acumulada de la variable de estudio, Cantidad de SIC por semana.

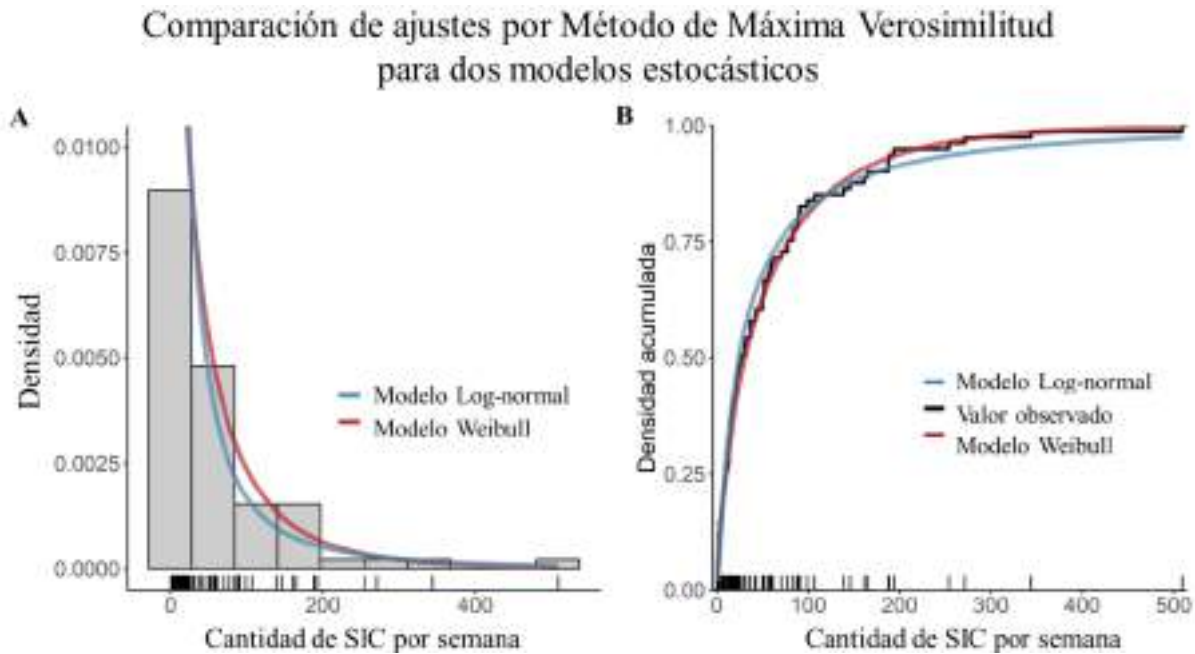


Figura 6: "Gráficos de densidad teórica versus observada."

Fuente: elaboración propia.

Se concluye que el modelo Weibull se ajusta mejor a la distribución de los datos y será el modelo utilizado para el desarrollo del modelo de simulación. Usando bootstrapping paramétrico, se obtiene el intervalo de confianza del 95% para los parámetros estimados:

$$\alpha \in [38,58 ; 63,75] \quad , \quad \beta \in [0,65 ; 0,87] \quad ,$$

Con potencia estadística $\frac{L(\theta)_{Weibull}}{L(\theta)_{Log-normal}} = 2,2360$.

En otras palabras, la evidencia respalda 2,2 a 1 que el modelo Weibull se ajusta mejor a los datos. Posteriormente y debido a que el período de entrenamiento del modelo es superior a un año, se establece el supuesto de que cada atributo aparece en una proporción constante. Esta conjetura permite simplificar la determinación de los coeficientes de cada

atributo en el modelo de simulación. De esta manera, el coeficiente paramétrico de simulación para cada variable equivale a la proporción que representa esta variable en el conjunto de datos.

Para analizar la convergencia de la simulación, se examinan las predicciones para cada escenario generado. La simulación se conduce para tamaños de muestra incrementales, iniciando en 200 y aumentando en 200, hasta llegar a 10.000. Después, se calcula el intervalo de confianza para la predicción media anual. El objetivo de esta etapa es descubrir cuál es el tamaño de muestra para un error estándar determinado.

La Figura 7 muestra tres aristas del análisis de convergencia, desagregadas por gráfico:

- A. El primer gráfico muestra un intervalo del 95% para la predicción media anual de los costos por concepto de mantenimiento recuperativo. La media muestral \bar{X} (línea puntuada roja) es \$1.040 millones de pesos, con intervalo de confianza para $\mu \approx 1040 \pm 3,56$ millones de pesos. La cantidad de simulaciones más grande para la que la predicción está fuera del intervalo es $n = 1300$.
- B. La asimetría del gráfico de densidad sugiere una distribución normal bimodal. La cola izquierda de la distribución fue generada por la variabilidad asociada a los primeros ensayos, de menos de 600 réplicas.
- C. El gráfico de error estándar muestra que, para tener un error de $0,01\bar{X}$ hacen falta 1.400 simulaciones.

Análisis de convergencia de la simulación Monte Carlo

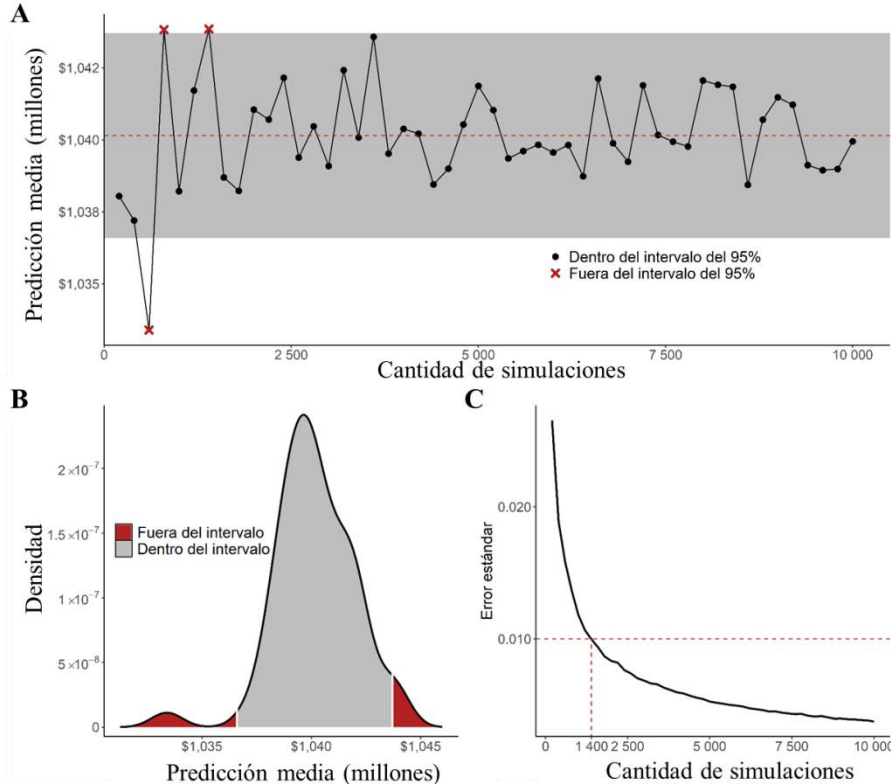


Figura 7: "Gráficos de convergencia de simulación Monte Carlo."

Fuente: elaboración propia.

Del análisis de convergencia se concluye que 1.400 simulaciones son suficientes para generar escenarios de mantenimiento confiables, con 1% de margen respecto al verdadero costo medio.

En la implementación del sistema inteligente, se explorarán alternativas con menos de 1.400 simulaciones, con el fin de reducir costos computacionales y dotar de rapidez al proceso de generar y comparar escenarios. La disminución en la precisión de las predicciones causada por disminuir la cantidad de simulaciones es aceptable hasta $0,04 \bar{X}$, conforme a lo manifestado por la DIVMAN, de acuerdo a estimaciones de años anteriores.

3. CONCLUSIONES

El sistema propuesto cumple con el objetivo de generar predicciones con incertidumbre medible, por lo tanto, se comprueba la factibilidad de la implementación de técnicas de aprendizaje automático para satisfacer las necesidades de la función de mantenimiento de la DIVMAN. Para conseguir desarrollar la herramienta de predicción, se recurrió a una metodología generalizada para la minería de datos (proceso KDD). El flujo

de trabajo y los algoritmos utilizados en este estudio, tienen aplicabilidad en todas las funciones de logística del Ejército que utilicen SIGLE como fuente de datos.

Bosques aleatorios es un algoritmo que ha existido por más de 20 años, y la revisión literaria confirma la versatilidad que tiene para ajustarse a usos diversos en variedad de industrias, por lo tanto, las predicciones generadas difícilmente serán insatisfactorias en el escenario actual, en el que no existe una herramienta semejante a disposición de la DIVMAN. Por esta razón, la confiabilidad de la predicción entregada por el sistema inteligente, dependerá de la calidad de los datos entregados por el modelo de simulación. Para que el sistema sostenga pronósticos confiables en el tiempo, el modelo de simulación debe ser actualizado y mejorado.

Alternativas para mejorar el modelo de simulación son: pronóstico de variables predictoras con modelos de series de tiempo; utilización de variables “retrasadas” para el ajuste del modelo predictor (este enfoque no usaría simulación); tratamiento de anomalías y predicción de costos como modelos paralelos en lugar de mixto.

Para que la utilización de técnicas más poderosas y sofisticadas (por ejemplo: Redes Neuronales Profundas, DNN) tenga éxito, debe existir significativa cantidad de datos, dado que estos algoritmos superan a los métodos de *ensemble* cuando el volumen de datos está en el orden de los millones de registros. Esta condición no se cumple en el contexto de este estudio, por lo que el uso de DNN se considera inadecuado e impráctico.

Con este trabajo culmina el desarrollo de un sistema inteligente para la predicción de costos. El próximo paso es diseñar un flujo de trabajo para que el modelo se reentrene con datos recientes, mediante una integración con SIGLE o la Intranet del Ejército.

Finalmente, es menester mencionar que este estudio aporta un precedente para la predicción de costos en la DIVMAN, que servirá como marco de referencia para la validación de modelos futuros.

BIBLIOGRAFÍA

- Bojer, C. S., & Meldgaard, J. P. (2020). Kaggle forecasting competitions: An overlooked learning opportunity. *International Journal of Forecasting*.
- Boussabaine, A. H., & Kirkham, R. J. (2004). Simulation of maintenance costs in UK local authority sport centres. *Construction Management and Economics*, 22(10), 1011-1020.
- Cardoso, J. B., de Almeida, J. R., Dias, J. M., & Coelho, P. G. (2008). Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks. *Advances in Engineering Software*, 39(6), 505–513.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016, August). Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 785-794).
- Gong, H., Sun, Y., Shu, X., & Huang, B. (2018). Use of random forests regression for predicting IRI of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 189, 890-897.
- Ibrahim, I. A., & Khatib, T. (2017). A novel hybrid model for hourly global solar radiation prediction using random forests technique and firefly algorithm. *Energy Conversion and Management*, 138, 413–425.
- Lim, S., & Chi, S. (2019). Xgboost application on bridge management systems for proactive damage estimation. *Advanced Engineering Informatics*, 41, 100922.
- Paolanti, M., Romeo, L., Felicetti, A., Mancini, A., Frontoni, E., & Loncarski, J. (2018, July). Machine learning approach for predictive maintenance in industry 4.0. In *2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)* (pp. 1-6). IEEE.
- Quiroz, J. C., Mariun, N., Mehrjou, M. R., Izadi, M., Mison, N., & Mohd Radzi, M. A. (2018). Fault detection of broken rotor bar in LS-PMSM using random forests. *Measurement*, 116, 273–280.
- Sharma, P., Kulkarni, M. S., & Yadav, V. (2017). A simulation based optimization approach for spare parts forecasting and selective maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 168, 274–289.
- Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). Genetic algorithms. In *Introduction to genetic algorithms* (pp. 15-37). Springer, Berlin, Heidelberg.

DETERMINACIÓN DE LA ETAPA DE VIDA DE UN ACTIVO MEDIANTE EL EMPLEO DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL Y LA CURVA DE DAVIES Y SUS RESPECTIVAS ACCIONES DE MANTENIMIENTO

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2020

Fecha de aceptación: 29 de febrero de 2021

TCL. Pablo De la Maza Aguayo ¹

Resumen: *Se entrega una forma de determinar la etapa de vida de un activo basada en el parámetro de forma "Beta" de la distribución Weibull, empleando la herramienta ofimática "Excel" a fin de determinar, en función de dicha etapa de vida, las estrategias y acciones de mantenimiento a ejecutar sobre un activo dado, en función del sistema o subsistema crítico del mismo.*

Palabras clave: *Curva de Davies, Weibull, Mantenimiento.*

DETERMINING THE LIFE STAGE OF AN ASSET THROUGH THE USE OF THE WEIBULL DISTRIBUTION AND THE DAVIES CURVE AND THEIR RESPECTIVE MAINTENANCE ACTIONS

Abstract: *A way to determine the life stage of an asset is provided based on the "Beta" parameter of the Weibull distribution, using the automation tool "Excel" in order to determine, depending on this life stage, the strategies and Maintenance actions to be executed on a given asset, depending on its critical system or subsystem.*

Keyword: *Davies curve, Weibull, Maintenance.*

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas Logísticos, mención Mantenimiento Academia Politécnica Militar y Máster en Ingeniería del Mantenimiento Universidad Politécnica de Valencia, España además es Experto Gestor de Mantenimiento, Asociación Española de Mantenimiento. Email: pdelamazaa@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2228-0846>.

1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se concluye del libro “Fundamentos del Mantenimiento” (Macián et al. 1999), el objetivo del mantenimiento es ser un servicio que debe ir en beneficio de la organización que lo requiere, donde sus principales objetivos por tanto son los de reducir los costos asociados a las detenciones no programadas y su consecuente pérdida de producción, este servicio debe buscar, además, reducir la degradación o deterioro del activo a mantener y, en función de la experiencia que tanto operadores como técnicos van adquiriendo con el tiempo, entregar esta en beneficio de la organización y sus sistemas productivos.

Considerando que en general en los componentes mecánicos, la función tasa de fallas ($\lambda(t)$) tiene la forma de la “Curva de Davies” (Mora Gutiérrez, 2009), se puede emplear dicha representación gráfica para determinar, en función de su $\lambda(t)$ y del valor del parámetro de forma Beta (β) de la distribución de Weibull, la etapa de vida de un activo.

Así, la curva de Davies se divide en tres fases, donde se muestra la evolución en el tiempo de las fallas y permite seleccionar de esta forma las tareas de mantenimiento asociadas a la fase en la cual se encuentra el activo.

Como se explicará a continuación más detalladamente, de forma genérica se puede definir que, dependiendo del valor que toma el parámetro de forma Beta, las acciones de mantenimiento pueden ser de tipo modificativas, correctivas, preventivas o predictivas, como así mismo se pueden definir, en lo general, las estrategias de mantenimiento a efectuar.

2. DESARROLLO

2.1. Metodología utilizada

La metodología utilizada para determinar la etapa de vida en la que se encuentra un activo, fue la diseñada por el autor en el Trabajo de Fin de Máster del Máster en Ingeniería en mantenimiento (De la Maza Aguayo, 2020) bajo el título de “Diseño de una metodología, mediante el análisis de “Weibull”, para la gestión del mantenimiento de la maquinaria del Cuerpo Militar del Trabajo” en la Universidad Politécnica de Valencia, y consistente en un conjunto de procedimientos cuantitativos y secuenciales que permiten obtener, desde el análisis y revisión de los datos, aquellos parámetros requeridos para la aplicación de los modelos matemáticos necesarios para la obtención de la etapa de vida de un activo, desagregando así esta metodología en 7 pasos repartidos en 2 fases, como son el “Proceso de recolección de datos” y la “Definición de la etapa de vida del activo”, como se observa en la Figura N°1.

2.2. Desagregación del activo

Para la correcta desagregación del activo, se emplea el método descrito en el libro “mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” de John Moubray (Moubray, 2000) donde el activo a analizar se considerará como el sistema principal, y se definen como subsistemas a aquellos sistemas de segundo nivel jerárquico, lo que incluye por tanto, la totalidad de los subsistemas y componentes de tercer o más nivel jerárquico, como se observa en la Figura N°2.

Para lo anterior, se puede emplear el manual de “Partes y piezas” del activo, o bien crear uno nuevo si se quiere levantar un sistema único de desagregación común para la totalidad de los activos de la organización.

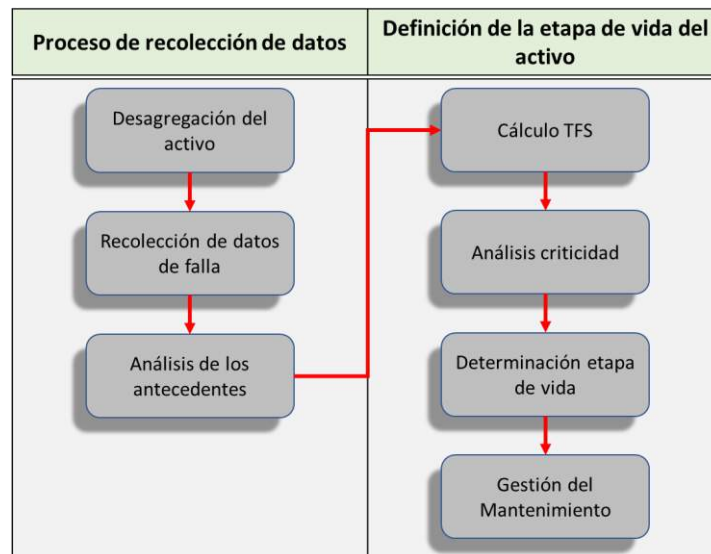


Figura N°1: “Diagrama de la metodología empleada”

Fuente: Elaboración propia.

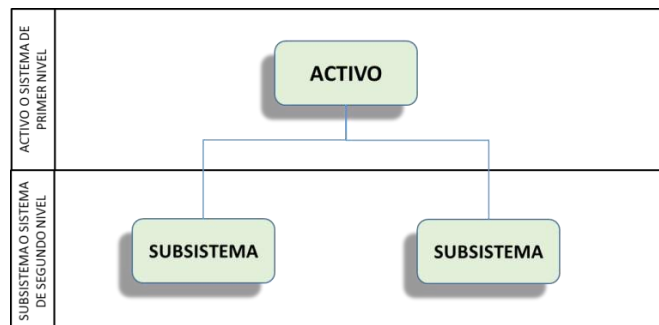


Figura N°2: “Desagregación de los activos”

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Recolección de datos de falla

Empleado una planilla Excel, los contenidos mínimos a considerar en la recolección de los antecedentes de los fallos del activo a analizar, son los de: Fecha de la falla, componente que falló, subsistema afectado, efecto de la falla sobre la máquina, fecha de reparación de la falla y el respectivo cuadro de observaciones, además de aquellos antecedentes que permitan posteriormente identificar el activo con el que se está trabajando.

Estos son los antecedentes que permitirán posteriormente, entre otras cosas, definir cuales detenciones son producto de fallos en algún componente o subsistema del Activo, eliminando así de esta forma aquellas detenciones que se realizan con motivo de mantenciones programadas u otras que no inciden en el tiempo fuera de servicio o disponibilidad operacional del activo analizado.

2.4. Análisis de los antecedentes

Una vez recolectado los datos de las fallas que presentó el activo y transferidos a la planilla Excel detallada anteriormente, se filtra por subsistema y descartan los registros de detenciones que se realizan producto de lo detallado en 2.3, y se copian los datos a una nueva planilla por cada subsistema que haya presentado tiempos fuera de servicio que dejaron al activo en condición de “no operacional”, quedando la nueva planilla conforme la figura N°3, en condiciones de realizar el cálculo del tiempo fuera de servicio.

FECHA FALLA	FECHA REPARACIÓN DE LA FALLA	TFS (hr)	COMPONENTE QUE FALLÓ	SUBSISTEMA AFECTADO	OBSERVACIONES
TOTAL TFS		=SUMA(C3:C19)			

Figura N°3: “Hoja de análisis de los antecedentes”
 Fuente: Elaboración propia.

2.5. Cálculo del Tiempo Fuera de Servicio (TFS)

Lo normal es que, para el cálculo de los tiempos fuera de servicio, estos se encuentren registrados mediante un software de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO), por lo que la obtención del total de dichos tiempos en el período a analizar será la sumatoria de estos, una vez filtrados. Por otra parte, si no se conoce el tiempo exacto de reparación de un fallo, y solo se tiene el antecedente de la fecha de reparación, entonces (y como una forma de unificar criterios similares para la totalidad de los fallos registrados) esta corresponderá a la resta entre la fecha de reparación de la falla y la fecha de la falla, multiplicado por el tiempo promedio de trabajo diario, si dicho resultado fuera igual a cero, el resultado será el tiempo promedio de trabajo diario, caso contrario se le adicionará una vez el tiempo promedio de trabajo diario, lo que supondrá jornadas completas. (De la Maza Aguayo, 2020)

Como una forma de explicar mejor lo anterior, y suponiendo el promedio diario de trabajo es de 14 horas (con dos turnos), se emplea la siguiente fórmula en Excel:

$$= SI(FR - FF) * 14 = 0; 14; ((FR - FF) * 14) + 14)$$

Donde:

FR: Fecha reparación de la falla

FF: Fecha de la falla

2.6. Análisis de criticidad

Se considerará que la etapa de vida en el que se encuentra el activo corresponde al subsistema más crítico desde el punto de vista de su mantenibilidad, confiabilidad e indisponibilidad, el análisis de criticidad se realiza mediante el método gráfico de “Jack Knife” (Knights, 2004), empleando un gráfico de dispersión con los diferentes subsistemas analizados en función de su “Frecuencia” (eje x) y su “MDT”¹ individual (eje y), donde la línea verde representa el promedio de los tiempos medios fuera de servicio de los subsistemas e indica la mantenibilidad general del activo, la línea azul representa el promedio de las frecuencias de falla de los subsistemas e indica la confiabilidad del activo y, la línea roja representa la indisponibilidad calculada como la ponderación entre la frecuencia y el tiempo medio fuera de servicio, quedando gráficamente lo anterior conforme la figura N°4, que se obtiene con los antecedentes ingresados en una nueva hoja de Excel denominada como “Análisis de criticidad de la tabla N°1.

¹ Del inglés “Mean down time” o tiempo medio fuera de servicio.

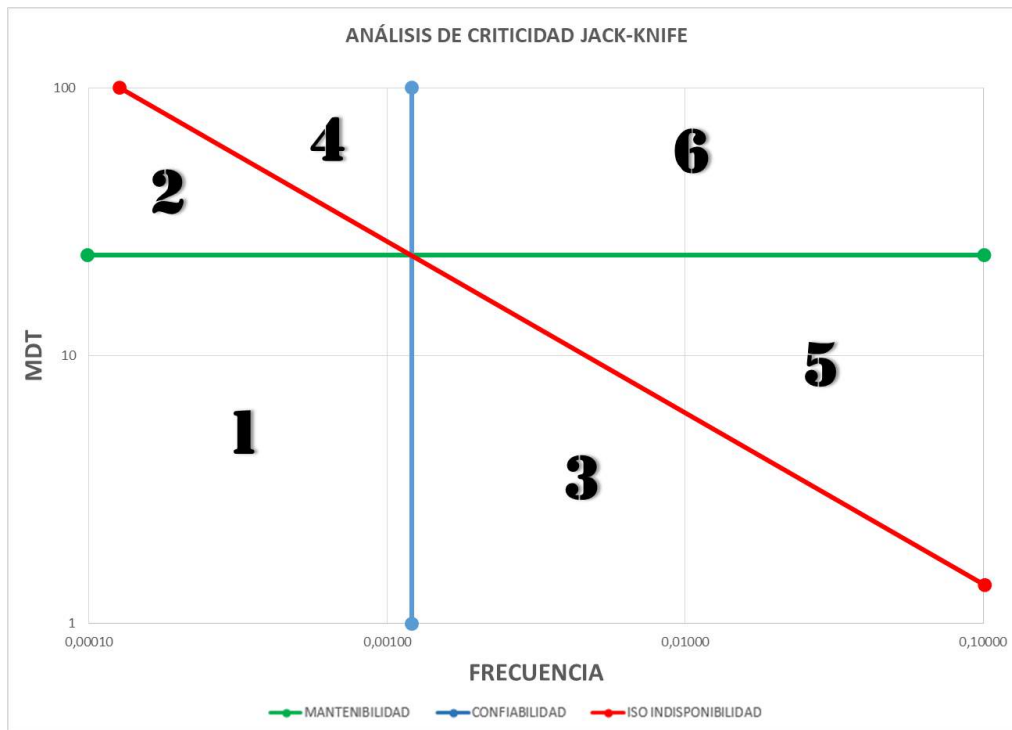


Figura N°4: “Gráfico de dispersión de análisis de criticidad”

Fuente: Elaboración propia.

Subsistema	Cantidad Fallas (uu)	Total TFS (Horas)	Frecuencia	MDT (horas)	Indisponibilidad %
A					
B					
C					
D					
E					
F					
G					
H					
TOTAL					

Disponibilidad Ind. Avg

Tabla N°1: “Análisis de criticidad”

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

Cantidad de fallas, corresponde al número de fallas que presentó el activo analizado durante todo el período de análisis.

Total TFS, este valor es la sumatoria de los tiempos fuera de servicio de cada falla de cada subsistema analizado.

Frecuencia, es la división entre la cantidad de fallas y las horas totales de operación posible en el período de tiempo analizado.

MDT, corresponde a la división entre los tiempos totales de fuera de servicio y la cantidad de fallas registrados en el período analizado.

Indisponibilidad, como el producto entre la frecuencia y el MDT.

Indisponibilidad (Ind. Avg), como el producto del promedio de la frecuencia de los subsistemas y el promedio del MDT de los subsistemas.

Para la correcta interpretación del análisis de criticidad empleando el método gráfico presentado, se debe observar que este presenta 6 sectores característicos donde los activos, sistemas, subsistemas o componentes pueden ser caracterizados, conforme lo siguiente:

2.6.1. Primer Sector

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son más mantenibles y confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad menor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

2.6.2. Segundo Sector

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son menos mantenibles, pero más confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad menor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

2.6.3. Tercer Sector

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son más mantenibles, pero son menos confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad menor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

2.6.4. Cuarto Sector

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son menos mantenibles, pero más confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad mayor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

2.6.5. Quinto Sector

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son más mantenibles, pero son menos confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad mayor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

2.6.6. Sexto Sector

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son menos mantenibles y confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad mayor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

En general, aquellos subsistemas o componentes que quedan ubicados en este sector del gráfico de dispersión representan los principales problemas de un activo y requieren de un monitoreo especial y seguimiento a fin de evitar o adelantarse a la falla que pudiese dejar no operacional el activo analizado.

2.7. Determinación etapa de vida del activo

Con la finalidad de determinar el respectivo parámetro de forma “Beta”, se completan los datos requeridos en la planilla Excel de la Tabla N°2 (de existir dos o más subsistemas críticos, se completan los datos requeridos en la planilla Excel de la Tabla N°2 tantas veces como sea necesario), conforme a lo siguiente:

2.7.1. Determinación del $t(0)$

Si se cuenta con la totalidad de la información histórica de las fallas, se ingresa el valor de la primera falla registrada del subsistema, que corresponde al período de tiempo t en que no presentó fallas, en el supuesto de no contar con dicha información, entonces se puede suponer que $\gamma=0$.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													

Tabla N°2: “Planilla Etapa de Vida”
 Fuente: Elaboración propia.

2.7.2. Horómetro a la falla

Se ingresan cronológicamente las fallas registradas en la Tabla N°2 en el caso probable de que existan más de una falla con el mismo horómetro, sólo se registra una de ellas.

2.7.3. Tiempo de falla t-t(0)

Corresponde a la sustracción entre los valores contenidos en las celdas de la columna “Horómetro a la falla” y el t(0).

2.7.4. Número de falla (i)

Se ingresan el orden secuencial de cada falla, de forma creciente, estos valores posteriormente se copian en la segunda columna “N° de Falla (i)” de la columna “F” de la hoja Excel de la Tabla N°2 desde i=1 a i=n-1 si el primer valor si es igual a cero, caso contrario de i=1 a i=n.

2.7.5. Tiempo de buen funcionamiento (t)

Para la obtención de los tiempo de buen funcionamiento, se realiza la sustracción del valor contenido en “Tiempo de falla t-t(0)” entre el valor (n+1)-n, con la salvedad del primer valor que siempre será igual a n.

Luego, se copian los valores de la columna para posteriormente ordenarlos de forma decreciente de menor a mayor, se descarta el primer valor si es igual a cero y se copian en la nueva columna “Tiempo de buen funcionamiento (i)” de la columna “G” de la hoja Excel de la Tabla N°2.

2.7.6. Segmentación de fallas $F(i)\%$

Se emplea la función de probabilidad acumulada de fallas con el método de rango de la mediana (Pascual J., 2005), si la población es pequeña, con los valores de la columna “F” N° de falla (i) de la hoja Excel de la Tabla N°2 desde i hasta N, conforme la siguiente ecuación:

$$F(i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} [\%]$$

En Excel:

$$= ("N^\circ \text{ de Falla } (i)" - 0,3) / (CONTAR(\$i\$: \$N\$) + 0,4)$$

O, con la función de distribución por el método de rangos medios (Pascual J., 2005):

$$F(i) = \frac{i}{N + 1} [\%]$$

En Excel:

$$= ("N^\circ \text{ de Falla } (i)") / (CONTAR(\$i\$: \$N\$) + 1)$$

2.7.7. Obtención parámetros Weibull

Para la obtención de los parámetros de Weibull se utiliza el método gráfico propuesto por Rodrigo Pascual en su libro “El arte de mantener” (Pascual J., 2005) mediante la utilización de un gráfico de dispersión, cuyos ejes X e Y son obtenidos desde la ecuación de la probabilidad acumulada de fallas para Weibull, como sigue:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

Resolviendo:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-Y}{\eta}\right)^\beta}$$

Como ya se calculó $t-t(0)$, entonces $Y=0$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Ordenando:

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Despejando la exponencial:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) = \beta \ln t - \beta \ln \eta$$

Comparando la ecuación anterior con una ecuación de la recta,

$$Y = aX - b$$

Se concluye que:

$$Y = \ln \ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right)$$

$$X = \ln t$$

$$a = \beta$$

$$b = \beta \ln \eta$$

Por lo que η se obtiene de la siguiente forma:

$$\eta = e^{-\left(\frac{b}{\beta}\right)}$$

Para obtener los parámetros requeridos y calcular la confiabilidad del sistema o subsistema, se hace mediante un gráfico de dispersión con línea de tendencia, de la cual se extraerán los valores de la ecuación de dicha recta, completando los valores del eje X e Y en la hoja Excel de la Tabla N°2, como sigue:

Eje X en Excel:

$$= LN(\text{Tiempo de buen funcionamiento } (t))$$

Eje Y en Excel:

$$= LN(LN(1/(1 - F(i)\%)))$$

Para la obtención de los parámetros b , β y η , estos se pueden extraer directamente desde la ecuación de la recta de la línea de tendencia del gráfico realizado con los ejes X e Y anteriormente definidos en la hoja Excel de la Tabla N°2 como se muestra a modo de ejemplo en la figura N°5, donde los parámetros obtienen los siguientes valores: Parámetro $\beta= 1,148$; Parámetro $b= - 5,340$; y Parámetro $\eta=e^{((b/\beta))}=e^{((-5,34)/1,148)}=104,749$

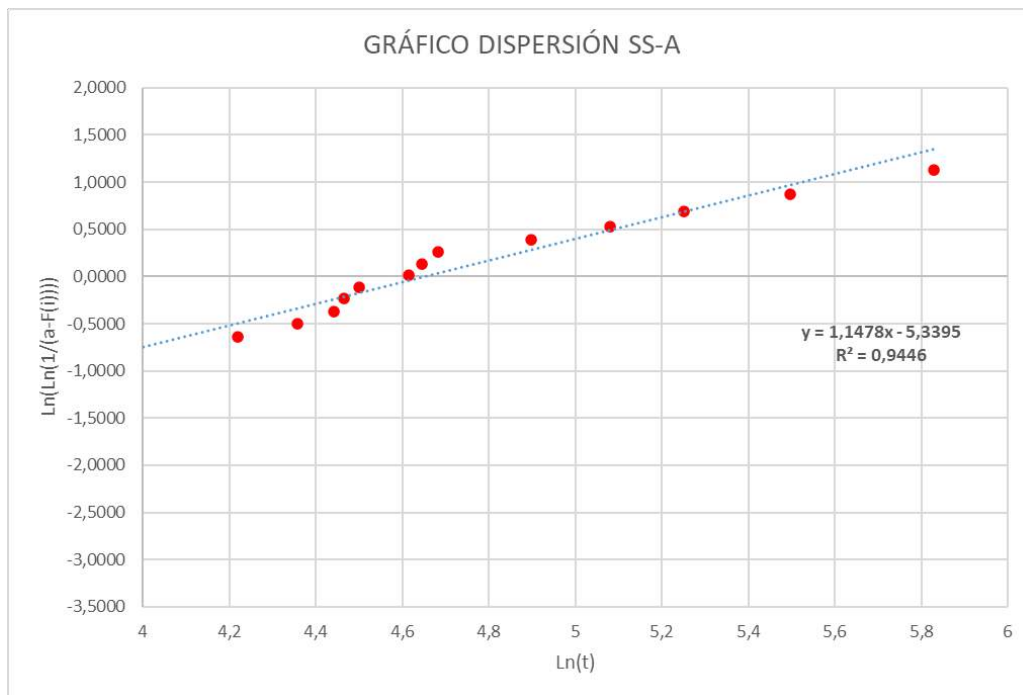


Figura N°5: "Gráfico de dispersión de análisis de criticidad"

Fuente: Elaboración propia.

Independiente de que se pueden obtener los valores de los parámetros directamente desde el gráfico de dispersión del subsistema crítico, estos se obtienen también desde la planilla de la Tabla N°2, utilizando la pendiente e intersección de los valores de los ejes definidos como X e Y, aplicando las siguientes fórmulas:

Parámetro β :

$$=PENDIENTE(Ji:JN;Ii:IN)$$

Parámetro b:

$$=INTERSECCION.EJE(Ji:JN;Ii:IN)$$

Parámetro η :

$$=EXP(-(INTERSECCION.EJE(Ji:JN;Ii:IN)/PENDIENTE(Ji:JN;Ii:IN)))$$

O bien:

$$=EXP(-(b/\beta))$$

Finalmente, y con los parámetros β y η obtenidos anteriormente, se puede calcular la confiabilidad del subsistema en los tiempos t de las fallas registradas, aplicando la fórmula de confiabilidad en la hoja Excel de la Tabla N°2, columnas “Q” y “R”, como sigue:

Confiabilidad en Excel:

$$=EXP(-POTENCIA((t/\eta);\beta))$$

2.8. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO SEGÚN LA ETAPA DE VIDA DEL ACTIVO

Tal y como se detalló en la parte introductoria del presente artículo, por lo general en los componentes mecánicos, la función tasa de fallas ($\lambda(t)$) tiene la forma de la “Curva de Davies” (Mora Gutiérrez, 2009), se puede emplear dicha representación gráfica para determinar, en función de su $\lambda(t)$ y del valor del parámetro de forma Beta (β) de la distribución de Weibull, la etapa de vida de un activo.

De forma genérica se puede definir que, como ya se vio anteriormente, dependiendo del valor del parámetro de forma Beta, las acciones de mantenimiento pueden ser de tipo modificativas, correctivas, preventivas o predictivas, como así mismo se pueden definir, en lo general, las estrategias de mantenimiento a efectuar, como se muestra en la figura N° 7, que presenta las bandas de aplicabilidad de las estrategias del mantenimiento.

Así, como se observa en la figura N° 6, la curva de Davies se divide en tres fases, donde se muestra la evolución en el tiempo de las fallas y permite seleccionar de esta forma las tareas de mantenimiento asociadas a la fase en la cual se encuentra el activo.

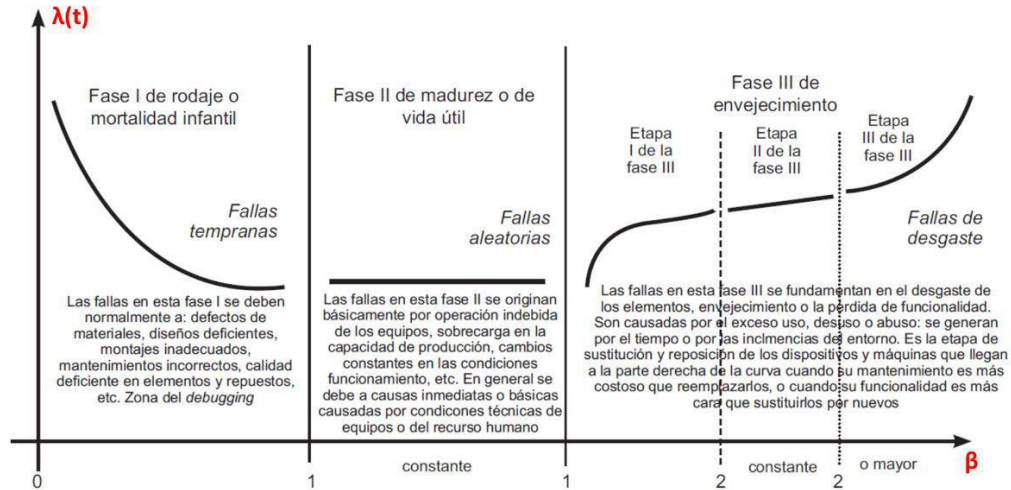


Figura N°6: “Curva de Davies”

Fuente: MORA, Luís (2009). Mantenimiento, planeación y control. México: Alfaomega, 108.

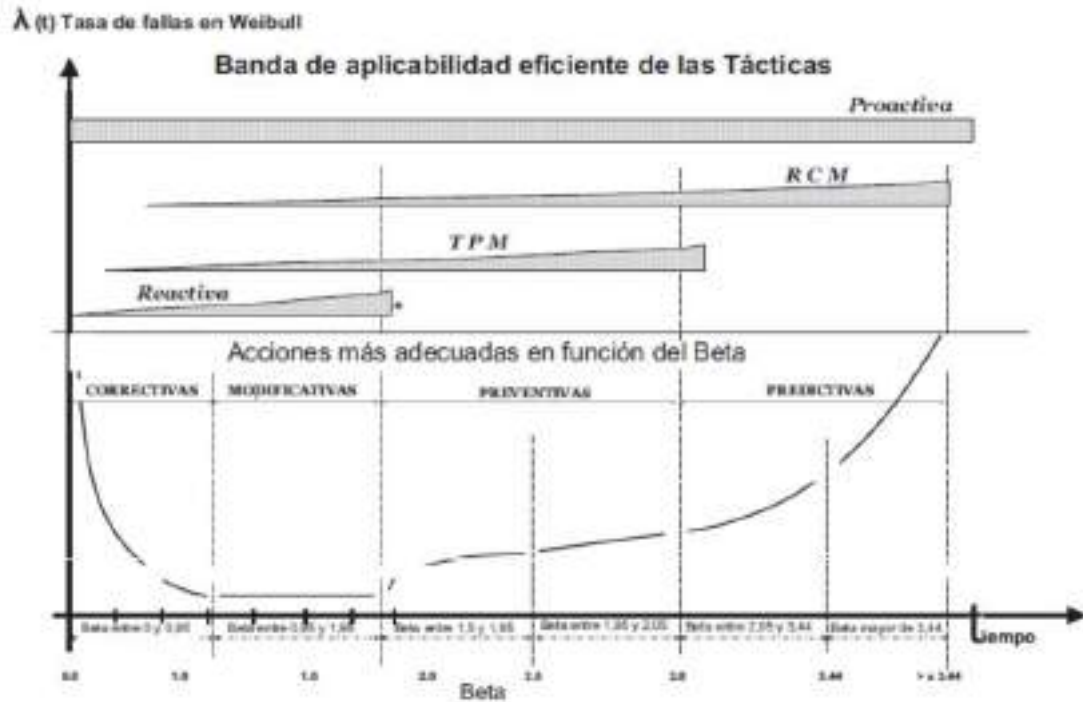


Figura N°7: “Banda de aplicabilidad eficiente de las Tácticas”

Fuente: MORA, Luís (2009). Mantenimiento, planeación y control. México: Alfaomega, 109.

2.9. Fase I

Durante la Fase I, de “Rodaje” o “Mortalidad Infantil” (Mora Gutiérrez, 2009) el valor que toma la tasa de falla $\lambda(t)$ es decreciente, es decir, va disminuyendo en función del tiempo, el parámetro de forma Beta (β) toma valores mayores a 0 pero menores a 1 (cercano a 0,95).

Las fallas normalmente están asociadas al asentamiento de piezas, problemas en el montaje, la instalación y puesta en marcha del activo, problemas de diseño del equipo, defectos en los materiales empleados para la confección del mismo o un inadecuado mantenimiento.

La estrategia de mantenimiento en esta fase será de tipo reactivo, realizándose principalmente acciones correctivas y, en segundo lugar, las modificativas. Las acciones correctivas se realizan principalmente ya que las fallas en esta etapa de vida del activo, son diferentes.

En el caso de la aparición de fallos recurrentes se debe identificar la función afectada, posteriormente los fallos funcionales del sistema (FF), sus circunstancias y finalmente, las causas del fallo funcional (Macián et al. 1999) para aplicar medidas correctivas (o modificativas si es del caso) de mantenimiento sobre el mismo.

Funciones	Modos de Fallo		
	FF	Circunstancia	Causas
1. Canalizar los gases...	1. No es capaz de...	1. Dando el motor su...	1. Fugas en juntas, bridas y manguitos. 2. Tubería de entrada turbina agrietada

Tabla N°3: “Ejemplo de causas”

Fuente: MACIÁN, Vicente et al (1999). Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento, 66.

Cuando los fallos están asociados a problemas en el montaje, la instalación y puesta en marcha del activo, problemas de diseño del equipo, defectos en los materiales empleados para la confección del mismo, se deben realizar las acciones modificativas tendientes a resolver dichos problemas.

Conforme la doctrina Institucional de mantenimiento, se ejecutarán los mantenimientos de tipo “preventivo” y “recuperativos”, de tipo mantenimiento preventivo inspectivo y mantenimiento recuperativo básico.

2.10. Fase II

Según Luís Mora (Mora Gutiérrez, 2009), las fallas de la denominada “Fase II” de la Curva de la Bañera (o Davies) se originan, principalmente, producto de errores humanos durante la operación de los activos, o por los cambios en las condiciones de operación de la misma, como así mismo, producto de una eventual sobrecarga de los niveles de operación. Es decir, las “condiciones técnicas de equipos o del recurso humano”.

Durante esta Fase II, de “Madurez” o de “Vida útil”, el valor que toma la tasa de falla $\lambda(t)$ es constante y cercana al valor 1 (uno), es decir, no varía en función del tiempo y se mantiene constante independiente de las acciones de mantenimiento se hayan o no realizado a componentes similares, es decir, su probabilidad de falla es igual entre componentes similares y por tanto, sus fallas tienden a ser aleatorias.

Al igual que en la Fase I, en el caso de la aparición de fallos recurrentes se debe identificar la función afectada, posteriormente los fallos funcionales del sistema (FF), sus circunstancias y finalmente, las causas del fallo funcional (Macián et al. 1999) para aplicar medidas correctivas de mantenimiento sobre el mismo mediante la aplicación de la Tabla N°3.

Si las fallas son producto de la utilización fuera del estándar del equipo (para lo que fue diseñado), las acciones de mantenimiento deben ser de tipo modificativo a fin de adaptar el activo a las nuevas condiciones de trabajo.

En esta fase, los problemas en el montaje, la instalación y puesta en marcha del activo, los problemas de diseño del equipo, los defectos en los materiales empleados debiesen haber sido ya detectados y corregidos, por lo que el activo entra en su normal funcionamiento, por lo que se puede comenzar a emplear técnicas de monitorizado para almacenar la información necesaria o “Espectro Base” del activo para posteriormente emplear estos datos en las acciones de mantenimiento Predictivo que pudiesen ser del caso aplicar a futuro.

Conforme la doctrina Institucional de mantenimiento, se ejecutarán los mantenimientos de tipo “preventivo” y “recuperativos”, de tipo mantenimiento preventivo inspectivo y conservativo, y mantenimiento recuperativo básico como se ha detallado anteriormente, además de iniciar la recolección de datos para un posterior empleo en el mantenimiento preventivo predictivo.

2.11. Fase III

En la Fase III o de “Envejecimiento”, toda vez que el tiempo va creciendo (moviéndose a la derecha del gráfico), se comienza a producir un aumento de la tasa de fallas, la cual va tomando valores cercanos a 1 por la parte superior a valores mucho mayores de 2.

Esta Fase, puede ser dividida en tres etapas (Mora Gutiérrez, 2009), donde cada una de ellas presentan características que los hacen identificables y a su vez, tienen diferentes estrategias de mantenimiento y las acciones sobre el activo, sistema, subsistema o componente variarán en función de cuan alejado este el parámetro de forma Beta del $t=0$.

2.11.1. Etapa I de la Fase III

En la Etapa I de la Fase III, se observa como la tasa de falla comienza lentamente a aumentar en la medida en que se aleja del $t=0$ y el parámetro de forma Beta toma valores superiores a 1 hasta valores cercanos al 2.

En esta Etapa las fallas que aparecen, por lo general son conocidas y por lo tanto ya se tiene experiencia sobre las mismas y se pueden realizar acciones preventivas sobre las mismas.

En esta Etapa, ya se debiese tener el árbol de “Causa – Efecto” completado y se continua la recopilación de los datos del monitorizado de los parámetros que se comenzaron a adquirir en la Fase II, por lo que algo de mantenimiento de tipo predictivo se puede hacer, pero será el mantenimiento de tipo preventivo el que más se empleará en esta Etapa de la Fase III.

Desde el punto de vista del mantenimiento Institucional, se mantendrá la ejecución de los mantenimientos de tipo “preventivo” y “recuperativos”, de tipo mantenimiento preventivo inspectivo y conservativo, y mantenimiento recuperativo básico como se ha detallado anteriormente, además de continuar la recolección de datos para eventualmente emplear un mantenimiento preventivo predictivo conforme los datos que se continúen obteniendo se alejan de los parámetros definidos con de “normal funcionamiento”.

2.11.2. Etapa II de la Fase III

La Etapa II de la Fase III, según Luís Mora (Mora Gutiérrez, 2009), es la Etapa donde se produce la transición desde el mantenimiento preventivo por excelencia, al mantenimiento predictivo con un importante factor de mantenimiento preventivo ya consolidado.

En esta Etapa, la tasa de fallas tiende a ser constante con una leve pendiente positiva y con valores del parámetro de forma Beta cercano a 2.

Una mayor incidencia del mantenimiento predictivo hace que la mayoría de las fallas puedan ser anticipadas, además el árbol de “Causa – Efecto” ya se debiese encontrar consolidado.

Desde el punto de vista del mantenimiento Institucional, se mantendrá la ejecución de los mantenimientos de tipo “preventivo” y “recuperativos”, de tipo mantenimiento Preventivo Inspectivo y Conservativo, y mantenimiento Recuperativo Básico como se ha detallado anteriormente, se comienzan a utilizar los datos de los parámetros de funcionamiento recolectado y analizados para ejecutar el mantenimiento Preventivo

Predictivo a medida que estos se alejen de los parámetros definidos como de “normal funcionamiento”, conforme lo siguiente:

2.11.3. Etapa III de la Fase III

Esta es la Etapa de la Fase III que es considerada como de “Envejecimiento Puro” (Mora Gutiérrez, 2009), donde la tasa de falla adquiere una tendencia claramente creciente en una pendiente positiva y con un crecimiento acelerado en la medida que el parámetro de forma Beta se aleja del $t=0$, alcanzando valores superiores a 2, o mucho mayores.

Dado que en esta Etapa las fallas son principalmente causadas por la acción del tiempo sobre los sistemas, subsistemas y componentes, se integra fuertemente el mantenimiento de tipo predictivo, complementado con los mantenimientos de tipo preventivo y correctivo, ya que el mantenimiento predictivo permitirá adelantarse, empleando métodos cuantitativos, al fallo del componente, pudiéndose de esta forma poder, eventualmente, realizar el cambio y sustitución del subsistema o componente que fallará.

Desde el punto de vista del mantenimiento Institucional, se mantiene la ejecución de los mantenimientos de tipo “Preventivo” y “Recuperativos”, de tipo mantenimiento Preventivo Inspectivo y Conservativo, y mantenimiento Recuperativo como se ha detallado anteriormente.

El Mantenimiento Preventivo Predictivo se transforma en un factor decisivo en la estrategia a seguir con respecto a las acciones y actividades de mantenimiento a ejecutar sobre el activo y sus sistemas, subsistemas y componentes, por lo que, en conjunto con el mantenimiento recuperativo básico, se puede llegar a utilizar el mantenimiento recuperativo mayor, donde se definirá si se requiere de una intervención mayor sobre el activo a mantener.

3. CONCLUSIONES

La presente metodología permite determinar las estrategias y acciones de mantenimiento basado en la etapa de vida de un activo, mediante el empleo de la distribución de Weibull y la curva de Davies, lo anterior dado que, en general, en los componentes mecánicos, la función tasa de fallas ($\lambda(t)$) tiene la forma de la “Curva de Davies” y por consecuencia, se puede emplear dicha representación gráfica para determinar, en función de su tasa de falla ($\lambda(t)$), y del valor del parámetro de forma Beta (β) (de la distribución de Weibull), la etapa de vida de un activo.

De esta forma, y una vez determinada la etapa de vida en la que se encuentra un activo, se pueden aplicar (o comenzar a implementar) las diferentes tácticas de gestión del mantenimiento (mantenimiento reactivo, TPM, RCM, proactiva, etc.) con sus respectivas acciones de mantenimiento, lo que permitirá no solamente aumentar la disponibilidad

operacional, sino que se tiende a disminuir los tiempos de indisponibilidad, medir y realizar acciones que buscan el minimizar los tiempos de demoras logísticas del MDT y, frente a la imposibilidad de gestionar correctamente los repuestos, aumentar los tiempos productivos del activo sujeto a la metodología gracias a la correcta planificación del ciclo logístico asociado al mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- De la Maza Aguayo, P. (2020). *Diseño de una Metodología, mediante el análisis de “Weibull”, para la gestión del Mantenimiento de la maquinaria del Cuerpo Militar del Trabajo*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Dhillon, B. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Boca Raton: CRC Press.
- Knights, P. (2004). Downtime Priorities. *Maintenance Journal*, 14-21.
- Macián Martínez, V., Tormos Martínez, B., & Olmeda González, P. (1999). *Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mora Gutiérrez, L. A. (2009). *Mantenimiento, planeación y control*. México: Alfaomega.
- Moubray, J. (2000). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. North Carolina: Aladon LLC.
- Pascual J., R. (2005). *El arte de mantener*. Santiago: Universidad de Chile.

MODELO DE LOCALIZACIÓN Y RUTEO DE VEHÍCULOS EN DOS FASES PARA EL ABASTECIMIENTO LOGÍSTICO EN EL CAMPO DE BATALLA

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2020

Fecha de aceptación: 29 de febrero de 2021

MAY. Luis San Martín Riveros¹

Resumen: *Las operaciones militares conllevan no solo un esfuerzo asociado a la maniobra de las unidades de combate, sino que también un estrés elevado a las unidades logísticas para satisfacer la demanda de clases logísticas. Este artículo presenta un modelo cuantitativo de optimización para resolver el problema de localización de instalaciones y ruteo de vehículos (VRP) integral en dos fases, con capacidades y bajo diferentes demandas, denominado 2E – CLRP. Los resultados obtenidos son alentadores en comparación con la formulación 2E – CWLPwTr, inclusive si la optimalidad de la solución propuesta no es certificada. Futuras líneas de investigaciones deben ser orientadas a reformulaciones más eficientes, formulaciones con demanda bajo incertidumbre y modelos multi-periodos.*

Palabras Claves: *Logística militar. Optimización entero lineal mixta. Localización de instalaciones. Problema de ruteo de vehículos (VRP). Problema de localización y ruteo de vehículos (LRP).*

MODEL OF LOCATION AND ROUTING OF VEHICLES IN TWO PHASES FOR THE LOGISTICAL SUPPLY IN THE BATTLEFIELD

Abstract: *Military operations involve not only an effort associated with the maneuvering of combat units, but also high stress on logistics units to meet the demand for logistics classes. This article presents a quantitative optimization model to solve the two-echelon location-routing problem under different demands, called 2E - CLRP. The results obtained are encouraging compared to the 2E - CWLPwTr formulation, even if the optimization of the proposed solution is not certified by the solver. Future lines of research should be oriented to more efficient reformulations, formulations with demand under uncertainty and multi-period models.*

Key Words: *military logistics. Mixed integer linear programming. Facility location. Vehicle Routing Problem (VRP). Locating – routing problem (LRP).*

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Armamentos de la Academia Politécnica Militar y Magister en Investigación de Operaciones de la Universidad de Edimburgo, Reino Unido. Jefe de Sección en la Dirección de Operaciones del Ejército. Email: luis.sanmartin@ejercito.cl ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1546-265X>

1. INTRODUCCIÓN

La logística militar tiene como propósito sostener las capacidades militares de las unidades que se encuentran empleadas en un determinado teatro de operaciones y que requieren cumplir una misión asignada. Como tal, es una disciplina que puede tener dos enfoques: el primero asociado al proceso de planificación y toma de decisiones; y el segundo relacionado con métodos cuantitativos que permitan configurar soluciones logísticas óptimas, robustas y confiables, aportando así al proceso de toma de decisiones.

En consecuencia, el presente artículo se orientará a plantear, modelar y resolver un problema de optimización que responda al segundo enfoque descrito anteriormente. Se desarrollará un modelo denominado “Problema de Localización y Ruteo de Dos Fases con Capacidades” o 2E-CLRP, como es comúnmente conocido en la comunidad científica por sus siglas en inglés.

El modelo propuesto desarrolla la tercera línea de investigación planteada por San Martín (2020) y que corresponde a una alternativa al modelo 2E-CWLPwTr presentada en dicho artículo. Por lo tanto, este estudio utilizará la misma situación ficticia sobre la cual se desarrolló el modelo 2E-CWLPwTr (San Martín, 2020), a fin de resolver la formulación 2E-CLRP y comparar los resultados entre ellas.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y CONTEXTO

El problema denominado 2E-CLRP tiene como propósito tanto la localización de instalaciones logísticas como la estructuración de circuitos de abastecimiento mediante la formulación del problema de ruteo de vehículos (VRP). La particularidad de este último tipo de problemas es que el abastecimiento se hace por ciclos, visitando a más de un cliente dentro del ciclo, solo que un cliente es visitado una vez por el abastecedor. La diferencia con el modelo 2E-CWLPwTr planteado por San Martín (2020) es que en dicha formulación los ciclos de abastecimiento se materializan mediante viajes de ida y vuelta directos entre las instalaciones logísticas y los clientes (relación uno a uno), sin visitar a otros clientes dentro del mismo trayecto. En la siguiente figura se presenta esquemáticamente la diferencia entre ambas formulaciones.

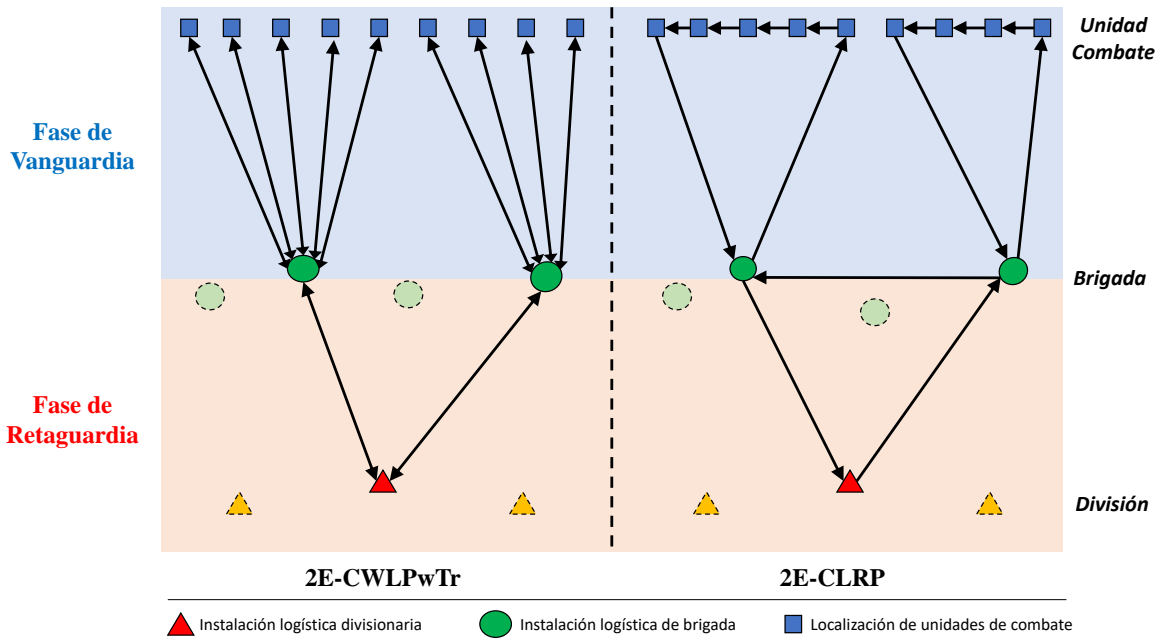


Figura N° 1 “Comparación de formulaciones 2E-CWLPwTr y 2E-CLRP”.
(Fuente: Elaboración propia)

Por lo tanto, el problema a resolver se describe de la siguiente forma: el dispositivo se divide en una fase de retaguardia y otra de vanguardia. La fase de vanguardia integra el primer escalón correspondiente a las unidades de combate y al segundo escalón compuesto por los sitios candidatos para activar una instalación logística de brigada (puesto de transbordo, para este estudio, tanto para brigadas acorazadas como motorizadas). Igualmente, la fase de retaguardia está compuesto por el segundo escalón antes señalado y el tercer escalón correspondiente a los sitios candidatos para activar instalaciones o depósitos generales a nivel división. Finalmente, las unidades de combate tienen requerimientos de diferentes clases logísticas, elementos que son demandados a las unidades logísticas, conforme al nivel de intensidad al que combaten (alto, medio y bajo), siendo determinísticos para esta formulación y que varían según el tipo de unidad de combate.

El propósito es resolver, al costo mínimo, el problema de localización de instalaciones divisionales y de puestos de transbordo, en conjunto con la estructuración de ciclos de abastecimiento, entre las instalaciones divisionales y puestos de transbordo (fase de retaguardia) y entre puestos de transbordo y unidades de combate (fase de vanguardia), mediante una formulación denominada 2E-CLRP. Todo lo anterior, disponiendo de distintos tipos de vehículos y clases logísticas a transportar.

Una vez resuelta la formulación 2E-CLRP, se compararán los resultados para los tres escenarios de combate con la formulación 2E-CWLPwTr, evaluando las ventajas y

desventajas de este tipo de problemas. Para mayores detalles de la descripción del problema, refiérase a (San Martín, 2020).

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En el campo de la optimización combinatoria, el problema del vendedor viajero (TSP) consiste en un vendedor que está obligado a visitar un número fijo de clientes, desde su instalación base, visitando a cada cliente exactamente una vez y regresando al mismo punto de partida al término del recorrido. Esta secuencia de nodos y arcos conforma un recorrido, que debe materializarse al costo mínimo (Dantzig, Fulkerson, & Johnson, 1954). Este problema se puede resolver mediante un enfoque de programación lineal-entera mixta (MIP) para reducir la magnitud combinatoria de los cálculos que deben realizarse (Dantzig, Fulkerson, & Johnson, 1959) (Miller, Tucker, & Zemlin, 1960).

Una variante del TSP se denomina problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem – VRP), en el que hay más de un solo vendedor (representado por vehículos) y, desde la fuente o instalación base, se pueden ejecutar más de un recorrido, bajo la misma modalidad que el TSP. Esto significa que podrían existir varios TSP combinados en este problema, conservando las principales restricciones del TSP (Semet, Toth, & Vigo, 2015). Una de las versiones más estudiadas de este problema es el VRP con capacidades (CVRP), en el que cada ruta o vehículo tiene una restricción de capacidad.

Además, el VRP con ventanas de tiempo (VRPTW) se puede formular como una extensión del CVRP, incluyéndose intervalos de tiempo de servicio asociado a cada cliente (Desaulniers, Madsen, & Ropke, 2015). En esta formulación, existe la posibilidad de violar las restricciones de tiempo con un costo de penalización asociado.

Periboli et.al. propone un modelo de CVRP de dos escalones. (Periboli, Tadei, & Vigo, 2011), donde se introduce una familia de 2E-VRP, considerando las versiones estándar 2E-VRP y 2E-CVRP. Esta formulación se resuelve mediante un enfoque MIP, incorporando desigualdades válidas y heurística.

Jepsen et.al. desarrolla un algoritmo de ramificación y corte (Jepsen, Spoorendonk, & Ropke, 2013) para el 2E-CVRP simétrico, a fin de resolver este problema mediante un método exacto. Su estrategia se centra en un modelo de flujo de arcos que proviene de una relajación y proporciona un límite inferior válido.

Paralelamente, Baldacci et.al. (2013) propone un algoritmo exacto para el 2E-CVRP, basado en una nueva formulación matemática que descompone este problema en un conjunto restringido de CVRP de varios depósitos. A través de esta nueva formulación, es posible obtener límites inferiores válidos y soluciones exactas para varias instancias.

Los modelos presentados anteriormente consideran que las localizaciones de los candidatos para el depósito general y el puesto de transbordo (intermedio) son fijas y conocidas. Ahora, el interés de este artículo es investigar sobre modelos similares, pero que tengan en cuenta las selecciones de las mejores localizaciones, tanto para los depósitos generales como para los puestos de transbordo, integrado en un solo modelo, junto con las rutas de abastecimiento.

Inicialmente, Perl y Daskin (1985) propusieron un problema de localización y ruteo a través de una formulación MIP. Además, se presenta un enfoque heurístico para resolver esta formulación matemática. Este estudio consideró una localización fija de los depósitos generales y la posibilidad de seleccionar aquellas instalaciones intermedias.

Ambrosino y Scutella (2005) establecen un diseño de red de distribución en el que combinan decisiones sobre la localización de las instalaciones, el almacenamiento, el transporte y la decisión de inventario a través de modelos estáticos y dinámicos. Algunas definiciones de este modelo son una extensión de las formulaciones de Perl y Daskin (1985) y otras se basan en elementos de flujo propuestos.

Boccia et.al. (2010) estudió el 2E-LRP desarrollando una metaheurística para su resolución, donde ahora se toma la decisión sobre el número óptimo de depósitos generales. La solución la proporciona un procedimiento heurístico de búsqueda tabú.

Igualmente, Boccia et.al. (2011) propuso un conjunto de modelos LRP basado en formulaciones MIP usando variables de uno, dos y tres índices. En la misma línea que su trabajo anterior, se toman decisiones sobre las localizaciones de instalaciones, además del diseño de recorridos de enrutamiento para cada camino.

4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

4.1. Generalidades

El 2E-CLRP es una formulación de un problema de localización de instalaciones (WLP) combinado con un problema de ruteo de vehículos (VRP), en el cual se define la ubicación de instalaciones logísticas y la programación para el abastecimiento logístico deseado. Este problema es de difícil resolución debido a que las decisiones de enrutamiento deben tomarse de acuerdo con la ubicación óptima de instalaciones, que también se define en función del costo mínimo de transporte.

La formulación matemática que se presenta a continuación tiene algunas características particulares que son diferentes del 2E-CWLPwTr. En primer lugar, esta formulación se centra en un enfoque de flujo de nodos, que difiere de la formulación tradicional basada en arcos en la forma en que se definen las variables. En la formulación basada en nodos, la

variable de flujo de elementos, tradicionalmente utilizada en las formulaciones basadas en arcos, se divide en cuatro variables continuas diferentes que indican el flujo de entrada y salida de elementos en cada nodo, según el nodo de la fase analizada.

Además, el proceso de estructuración del circuito de ruteo para el abastecimiento logístico sigue un enfoque CVRP. Adicionalmente, para evitar que un solo vehículo no pueda satisfacer la demanda de un cliente, los planificadores logísticos pueden asimilar cada vehículo del modelo a un convoy. De esta manera, la capacidad del convoy será n veces la capacidad individual del vehículo. Esta simple regla permite a los planificadores tener una forma flexible de estructurar la solución logística sin estar restringida a la capacidad específica de un vehículo.

Hay algunas formulaciones de flujo de nodos, como el modelo presentado por Toyoglu et.al. (2011). Sin embargo, la formulación propuesta en este artículo se destaca principalmente de la anterior en que el número de visitas a los clientes, independientemente de si es un candidato a puesto de transbordo o depósito general divisional, se fija como máximo una vez, lo que significa que un cliente solo puede recibir artículos de un convoy y por la cantidad total de productos que se requirieron. Aunque esta es una característica particular asumida para este estudio, se puede relajar si el planificador logístico o el tomador de decisiones decide hacerlo.

4.2. Formulación 2E-CLRP

El modelo 2E-CLRP es un problema combinado de localización de instalaciones y ruteo de vehículos para el apoyo, mediante dos escalones de apoyo y un escalón operativo. Por un lado, se seleccionan las localizaciones de las instalaciones de la unidad logística de la división y de la brigada (o puestos de trasbordo). Luego, se configuran los viajes en modalidad de circuito, en las fases de vanguardia y retaguardia, a fin de satisfacer la demanda del primer escalón (unidades de combate).

4.2.1. Definición de Conjunto de datos, parámetros y variables de decisión del modelo 2E-CLRP

En las tablas N°1, 2 y 3 se definen los conjuntos de datos, parámetros y variables de decisión del modelo a ser utilizados en la formulación propuesta.

En la tabla de definición de conjuntos, se presentan tanto los conjuntos que permiten identificar los parámetros y variables bajo una numeración determinada y, a base de ellos, ordenar el proceso combinatorio.

Conjuntos	
\mathcal{J}	: Conjunto de todos los nodos de clientes (unidades de combate).
\mathcal{J}	: Conjunto de las posibles localizaciones de puestos de transbordo o instalaciones de brigada.
\mathcal{H}	: Conjunto de las posibles localizaciones de instalaciones divisionales.
\mathcal{F}	: Conjunto de todos los puestos de transbordo y nodos de clientes en la fase de vanguardia.
\mathcal{B}	: Conjunto de todas las instalaciones divisionales y los puestos de transbordo en la fase de retaguardia.
\mathcal{N}	: Conjunto de todos los posibles nodos del sistema (instalaciones divisionales, puestos de transbordo y nodos de clientes o unidades de combate).
\mathcal{K}	: Conjunto de vehículos de la fase de vanguardia.
\mathcal{L}	: Conjunto de vehículos de la fase de retaguardia.
\mathcal{V}	: Conjunto de todos los vehículos utilizados en el sistema.
\mathcal{G}	: Conjunto de las clases logísticas transportadas a los clientes (unidades de combate).

Tabla N° 1 “Conjunto de datos del problema”.

Fuente: elaboración propia

En la tabla de definición de parámetros se presentan todas las constantes numéricas y vectores que se utilizarán más adelante.

Parámetros	
f_j	: Costo fijo de abrir una instalación divisional o puesto de transbordo $\forall i \in \mathcal{B}$.
d_{ij}	: Distancia recorrida entre un nodo “i” y un nodo “j” $\forall (i, j) \in \mathcal{N}$.
t_{ij}	: Tiempo en recorrer entre un nodo “i” y un nodo “j” (división entre distancia y velocidad).
r^{gv}	: Alcance máximo del vehículo $v \in \mathcal{V}$ que transporta un elemento g .
s^v	: Velocidad promedio del vehículo $v \in \mathcal{V}$.
a^{gv}	: Costo de operación del vehículo $v \in \mathcal{V}$ que transporta un elemento g .
V^{gv}	: Capacidad de transporte del vehículo $v \in \mathcal{V}$ que transporta un elemento g .
VT^v	: Capacidad total de transporte del vehículo $v \in \mathcal{V}$ para todos los tipos de elementos.
$(te)_i^g$: Tiempo más temprano en que el cliente “i” puede recibir un elemento g .

Parámetros	
$(tl)_i^g$: Tiempo más tardío en que el cliente “i” puede recibir un elemento g .
$(tm)^g$: Máximo de los tiempos más tardíos en que el cliente “i” puede recibir un elemento g . Se representa por $tm^g = \max_{i \in \mathcal{J}} (tl)_i^g$.
(tm)	: Máximo de todos los tiempos más tardíos en que el cliente “i” puede recibir cualquier elemento g . Se representa por $tm = \max_{g \in \mathcal{G}} (tm^g)$.
Φ^{gv}	: Factor de consumo de combustible de un vehículo $v \in \mathcal{V}$ que transporta un elemento g .
b_i^g	: Demanda esperada del cliente “i” para un elemento g .
ρ	: Número máximo de puestos de transbordo a ser abiertos.
λ	: Número máximo de instalaciones divisionales a ser abiertas.
Q_i^g	: Capacidad máxima de acopio de un elemento g en un sitio $i \in \mathcal{B}$.
pr^v	: Precio, en USD, de un litro de combustible para cada tipo de vehículo, k y l , de acuerdo a las fases de la red logística (vanguardia o retaguardia).

Tabla N° 2 “Parámetros del problema”.

Fuente: elaboración propia

Finalmente, la tabla de variables de decisión muestra todas las variables binarias y continuas que se usarán en el modelo. En esta formulación, las variables continuas no negativas representan una cantidad de elementos que entran y salen de un nodo.

Variables de decisión	
x_{ij}^k	: Variable binaria para decidir si un vehículo k viaja desde un nodo “i” a un nodo “j”, donde $i, j \in \mathcal{F}$.
z_{ij}^l	: Variable binaria para decidir si un vehículo l viaja desde un nodo “i” a un nodo “j”, donde $i, j \in \mathcal{B}$.
u_i^{gv}	: Variable binaria que indica si un elemento g es enviado o traído desde un nodo $i \in \mathcal{F}$ por un vehículo $v \in \mathcal{V}$.
y_i	: Variable binaria que define si un sitio de transbordo o una instalación divisionaria es abierta, donde $i \in \mathcal{B}$.
$(wo)_h^{gl}$: Variable continua que indica la cantidad de un elemento g que es transportado por un vehículo $l \in \mathcal{L}$ desde la instalación divisionaria $h \in \mathcal{H}$.
$(fi)_j^{gl}$: Variable continua que indica la cantidad de un elemento g que es transportado por un vehículo $l \in \mathcal{L}$ a un puesto de transbordo $j \in \mathcal{J}$ (entrada al puesto).

Variables de decisión	
$(fo)_j^{gk}$: Variable continua que indica la cantidad de un elemento g que es transportado por un vehículo $k \in \mathcal{K}$ desde un puesto de transbordo $j \in \mathcal{J}$ (salida del puesto).
$(ci)_i^{gk}$: Variable continua que indica la cantidad de un elemento g que es transportado por un vehículo $k \in \mathcal{K}$ a un cliente $i \in \mathcal{I}$ (entrada al cliente).
$(tg)_i^g$: Variable continua que señala la hora de arribo de un elemento g a un nodo $i \in \mathcal{N}$.
$(tv)_i^v$: Variable continua que señala la hora de arribo de un vehículo $v \in \mathcal{V}$ a un nodo $i \in \mathcal{N}$.

Tabla N° 3 “Variables de decisión”.

Fuente: elaboración propia

4.2.2. Definición de restricciones de la formulación 2E-CLRP

Las restricciones N°1 y 2 establecen el número máximo de instalaciones que se pueden activar, ya sean depósitos generales o puestos de transbordo. Esta desigualdad se puede transformar en igualdad de tal manera que los planificadores logísticos puedan seleccionar con exactitud el número deseado de instalaciones.

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} y_j \leq \rho$$

Ecuación N° 1

$$\sum_{h \in \mathcal{H}} v_h \leq \lambda$$

Ecuación N° 2

Las restricciones N°3 y 4 determinan que un destino, ya sea un puesto de transbordo o una unidad de combate, solo puede ser visitado una vez. Esto permite a los planificadores controlar el flujo de vehículos que se dirige a los diferentes sitios y generar una solución más sencilla al problema logístico. Si el tomador de decisiones opta por liberar el número de entradas a las distintas instalaciones, esta restricción debe eliminarse o modificarse, según el propósito y la orientación final.

$$\sum_{\substack{i \in \mathcal{B} \\ i \neq j}} \sum_{l \in \mathcal{L}} z_{ij}^l \leq 1 \quad \forall j \in \mathcal{J}$$

Ecuación N° 3

$$\sum_{\substack{i \in \mathcal{F} \\ i \neq j}} \sum_{k \in \mathcal{K}} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall j \in \mathcal{J}$$

Ecuación N° 4

La restricción N°5 establece que el número de cada elemento (por clase logística) que recibe una unidad de combate debe ser igual a su demanda. Asimismo, los planificadores pueden relajar esta restricción para recibir más artículos, en caso de que pretendan

almacenar algunas cantidades por emergencia o realizar el recorrido incluso si no es posible satisfacer la demanda total del cliente (no permitido en esta formulación).

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} (ci)_i^{gk} = b_i^g \quad \forall i \in \mathcal{J}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 5

Las restricciones N°6 y 7 aseguran que la carga completa que sale de un sitio se entrega en el destino final. Por lo tanto, el número total de artículos que se cargaron en camiones en un almacén determinado se coloca en uno o más puntos de transbordo, y así sucesivamente. Permite que el sistema no genere sobrecargas en los vehículos y evite viajes innecesarios.

$$\sum_{h \in \mathcal{H}} (wo)_h^{gl} = \sum_{j \in \mathcal{J}} (fi)_j^{gl} \quad \forall l \in \mathcal{L}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 6

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} (fo)_j^{gk} = \sum_{i \in \mathcal{J}} (ci)_i^{gk} \quad \forall k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 7

La restricción N°8 señala que el número total de artículos que ingresan a un puesto de transbordo deben salir posteriormente. Significa que este modelo no permite el almacenamiento de artículos.

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} (fi)_j^{gl} = \sum_{k \in \mathcal{K}} (fo)_j^{gk} \quad \forall j \in \mathcal{J}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 8

Las restricciones N°9 y 10 permiten que los vehículos abandonen un nodo como máximo una vez. A través de esta restricción, es posible evitar que un vehículo realice más de un recorrido en caso de que sea más económico y que tenga más capacidad de transporte que otros vehículos.

$$\sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{j \in \mathcal{J}} z_{hj}^l \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{L}$$

Ecuación N° 9

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{i \in \mathcal{J}} x_{ji}^k \leq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K}$$

Ecuación N° 10

Las restricciones N°11 y 12 establecen que cada vehículo debe regresar al sitio que dejó al iniciar un recorrido. Esta restricción es especialmente útil si los planificadores no quieren mezclar los diferentes vehículos. De lo contrario, es posible relajarlo y permitir que los camiones regresen al sitio más cercano.

$$\sum_{j \in J} z_{jh}^l = \sum_{j \in J} z_{hj}^l \quad \forall h \in \mathcal{H}, l \in \mathcal{L}$$

Ecuación N° 11

$$\sum_{i \in J} x_{ji}^k = \sum_{i \in J} x_{ij}^k \quad \forall j \in J, k \in \mathcal{K}$$

Ecuación N° 12

Las restricciones N°13 y 14 ordenan a cada vehículo que abandone el nodo en el que previamente entró. En caso de que los planificadores requieran que los vehículos permanezcan en el lugar donde descargaron toda su carga, también se puede relajar la restricción.

$$\sum_{\substack{b \in \mathcal{B} \\ b \neq j}} z_{bj}^l = \sum_{\substack{b \in \mathcal{B} \\ b \neq j}} z_{jb}^l \quad \forall j \in J, l \in \mathcal{L}$$

Ecuación N° 13

$$\sum_{\substack{f \in \mathcal{F} \\ f \neq i}} x_{fi}^k = \sum_{\substack{f \in \mathcal{F} \\ f \neq i}} x_{if}^k \quad \forall i \in J, k \in \mathcal{K}$$

Ecuación N° 14

Las restricciones N°15, 16, 17 y 18 muestran que el flujo de un nodo a otro existirá solo si este flujo es menor o igual a la capacidad de destino. Además, si el sitio no se activa, no existirá algún flujo posible. Esto es válido para las restricciones N°15 y 17. Para las restricciones N°16 y 18, se asegura que habrá flujo desde un sitio activo incluso si es demasiado costoso. Permite evitar que se active un sitio, pero no se asigne flujo alguno.

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} (wo)_h^{gl} \leq Q_h^g y_h \quad \forall h \in \mathcal{H}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 15

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} (wo)_h^{gl} \geq y_h \quad \forall h \in \mathcal{H}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 16

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} (fo)_j^{gk} \leq Q_j^g y_j \quad \forall j \in J, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 17

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} (fo)_j^{gk} \geq y_j \quad \forall j \in J, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 18

Las restricciones N°19 y 20 establecen que no se permitirá ningún recorrido si no se respeta la capacidad del vehículo. Evita que un vehículo se cargue con más elementos de los que puede. Esta restricción se refiere a la capacidad específica que tiene un vehículo para transportar un elemento. Por ejemplo, un vehículo puede transportar, como máximo, un número “a” de artículos de tipo “A”, pero podría tener más disponibilidad para otros tipos de artículos.

$$\sum_{j \in J} (fi)_j^{gl} = V^{gl} \cdot \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{j \in J} z_{hj}^l \quad \forall l \in \mathcal{L}, g \in \mathcal{G} \quad \sum_{i \in J} (ci)_i^{gk} = V^{gk} \cdot \sum_{j \in J} \sum_{i \in J} x_{ji}^k \quad \forall k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 19**Ecuación N° 20**

Las restricciones N°21 y 22 son similares a la N°19 y 20, pero se refieren a la capacidad total que tiene un vehículo. Significa que no se puede exceder la capacidad total del vehículo o convoy para transportar todo tipo de artículos.

$$\sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{h \in \mathcal{H}} (wo)_h^{gl} = VT^l \cdot \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{j \in \mathcal{J}} z_{hj}^l \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{j \in \mathcal{J}} (fo)_j^{gk} = VT^k \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{i \in \mathcal{I}} x_{ji}^k \quad \forall k \in \mathcal{K}$$

Ecuación N° 21

Ecuación N° 22

Las restricciones N°23, 24, 25 y 26 aseguran que existirá un flujo si y solo si existe disponible un vehículo que pueda transportar los elementos demandados. De lo contrario, no es posible enviar un vehículo ni generar flujo desde o hacia un nodo en particular. Por lo tanto, establece que, si no se asigna un vehículo, es imposible tener flujo.

$$(wo)_h^{gl} \leq V^{gl} \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}} z_{hj}^l \quad \forall h \in \mathcal{H}, l \in \mathcal{L}, g \in \mathcal{G} \quad (fi)_j^{gl} \leq V^{gl} \cdot \sum_{\substack{b \in \mathcal{B} \\ b \neq j}} z_{bj}^l \quad \forall j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 23

Ecuación N° 24

$$(fo)_j^{gk} \leq V^{gk} \cdot \sum_{i \in \mathcal{I}} x_{ji}^k \quad \forall j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G} \quad (ci)_i^{gk} \leq V^{gk} \cdot \sum_{\substack{f \in \mathcal{F} \\ f \neq i}} x_{fi}^k \quad \forall i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 25

Ecuación N° 26

Las restricciones N°27, 28 y 29 establecen que existirá flujo si y solo si la variable binaria $u_i^{gv} \forall g \in \mathcal{G}, v \in \mathcal{V}, i \in \mathcal{F}$ es igual a uno. Esta variable permite que el modelo active el flujo desde o hacia un nodo.

$$u_j^{gl} \leq (fi)_j^{gl} \quad \forall j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, g \in \mathcal{G} \quad u_j^{gk} \leq (fo)_j^{gk} \quad \forall j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 27

Ecuación N° 28

$$u_i^{gk} \leq (ci)_i^{gk} \quad \forall i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 29

Las restricciones N°30, 31 y 32 son complementarias a las restricciones anteriores en el sentido de que, además, habrá flujo si y solo si existe suficiente capacidad de transporte en los camiones.

$$(fi)_j^{gl} \leq V^{gl} \cdot u_j^{gl} \quad \forall j \in J, l \in \mathcal{L}, g \in \mathcal{G} \quad (fo)_j^{gk} \leq V^{gk} \cdot u_j^{gk} \quad \forall j \in J, k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 30**Ecuación N° 31**

$$(ci)_i^{gk} \leq V^{gk} \cdot u_i^{gk} \quad \forall i \in J, k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 32

Las restricciones N°33 y 34 determinan la limitante de tiempo que existe para suministrar un elemento a un cliente. Así, relacionan el tiempo de entrega más temprano posible $(te)_i^g$ con el tiempo de entrega actual o estimado $(tg)_i^g$ y este último con el tiempo de entrega más tardío $(tl)_i^g$.

$$(te)_i^g \leq (tg)_i^g \quad \forall i \in J, g \in \mathcal{G}$$

$$(tg)_i^g \leq (tl)_i^g \quad \forall i \in J, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 33**Ecuación N° 34**

Las restricciones N°35, 36, 37 y 38 corresponden a las restricciones de eliminación de subciclos.

$$(tv)_h^l + z_{hj}^l \cdot \frac{d_{hj}}{s^l} - (tm) \cdot (1 - z_{hj}^l) \leq (tv)_j^l \quad \forall j \in J, h \in \mathcal{H}, l \in \mathcal{L}$$

Ecuación N° 35

$$(tv)_i^l + z_{ij}^l \cdot \frac{d_{ij}}{s^l} - (tm) \cdot (1 - z_{ij}^l) \leq (tv)_j^l \quad \forall i, j \in J | i \neq j, l \in \mathcal{L}$$

Ecuación N° 36

$$(tv)_i^k + x_{ji}^k \cdot \frac{d_{ji}}{s^k} - (tm) \cdot (1 - x_{ji}^k) \leq (tv)_i^k \quad \forall i \in I, j \in J, k \in \mathcal{K}$$

Ecuación N° 37

$$(tv)_i^k + x_{ij}^k \cdot \frac{d_{ij}}{s^k} - (tm) \cdot (1 - x_{ij}^k) \leq (tv)_j^k \quad \forall i, j \in I | i \neq j, k \in \mathcal{K}$$

Ecuación N° 38

La restricción N°39 obliga a que la hora de llegada de un tipo de artículo $(tg)_j^g$ sea la misma que la hora de llegada del vehículo a ese nodo $(tv)_j^k$. Luego, permite mantener la sincronización entre la entrega del producto y los tiempos de viaje del vehículo. Además, restringe que la entrega del artículo se ejecute no más allá que el tiempo máximo permitido $(tm)^g$ en el que un cliente puede recibir productos.

$$(tg)_j^g - (tm)^g \cdot (1 - u_j^{gk}) \leq (tv)_j^k \quad \forall j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 39

De manera similar a la restricción N°39, las restricciones N°40 y 41 establecen que los tiempos de llegada de los vehículos (tv) deben ser los mismos que aquel de los productos (tg). Por lo tanto, si hay flujo a través de ese nodo, los tiempos serán los mismos. De lo contrario, la desigualdad se mantiene y no hay tiempo compartido.

$$(tv)_j^g - (tm)^g \cdot (1 - u_j^{gl}) \leq (tg)_j^g \quad \forall j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 40

$$(tv)_i^g - (tm)^g \cdot (1 - u_i^{gk}) \leq (tg)_i^g \quad \forall i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 41

Las restricciones N°42, 43, 44 y 45 están relacionadas con desigualdades válidas que se pueden implementar para facilitar la convergencia y el desempeño de esta formulación. Estas restricciones establecen que no es posible realizar un viaje si no hay flujo. Significa que un vehículo debe abandonar un nodo ya ocupado habiendo entregado los elementos transportados. De lo contrario, no habrá vehículo y flujo disponibles. Por ejemplo, si la salida del puesto de transbordo es igual a cero, la única posibilidad que tiene la variable x es tomar el valor cero, por lo que no habrá vehículo asignado a la ruta.

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} z_{hj}^l \leq \sum_{g \in \mathcal{G}} (wo)_h^{gl} \quad \forall h \in \mathcal{H}, l \in \mathcal{L}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} x_{ji}^k \leq \sum_{g \in \mathcal{G}} (fo)_j^{gk} \quad \forall j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}$$

Ecuación N° 42

$$\sum_{\substack{b \in \mathcal{B} \\ b \neq j}} z_{bj}^l \leq \sum_{g \in \mathcal{G}} (fi)_j^{gl} \quad \forall j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}$$

Ecuación N° 43

$$\sum_{\substack{f \in \mathcal{F} \\ f \neq i}} x_{fi}^k \leq \sum_{g \in \mathcal{G}} (ci)_i^{gk} \quad \forall i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}$$

Ecuación N° 44

Ecuación N° 45

Las ecuaciones N°46 y 47 presentan las restricciones de rango, que limitan la duración de cada recorrido a la capacidad máxima del vehículo. Significa que cada convoy tendrá un alcance máximo, basado en el alcance mínimo de los vehículos que lo componen.

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} d_{ij} z_{ij}^l \leq r^{gl} \quad \forall l \in \mathcal{L}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 46

$$\sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{j \in \mathcal{F}} d_{ij} x_{ij}^k \leq r^{gk} \quad \forall k \in \mathcal{K}, g \in \mathcal{G}$$

Ecuación N° 47

4.2.3. Definición de la función objetivo 2E-CLRP.

La ecuación N°48 corresponde a la función objetivo a minimizar en esta formulación. La primera parte busca cuantificar el costo fijo que existe cuando se activa un puesto de transbordo e instalación divisionaria. La segunda y tercera parte de la ecuación establecen que si hay un vehículo que se asigna a una ruta, existirá un costo operativo y este costo se cuantifica tanto para las fases de retaguardia como de vanguardia. Finalmente, la cuarta y quinta parte miden el costo de viaje entre nodos también para las fases de retaguardia como de vanguardia.

$$\begin{aligned} \min_{x,y,z} \sum_{b \in B} f_b \cdot y_b + \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{l \in \mathcal{L}} z_{hj}^l \cdot a^{gl} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{k \in \mathcal{K}} x_{ji}^k \cdot a^{gk} \\ + \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{g \in \mathcal{G}} z_{ij}^l \cdot \phi^{gl} \cdot d_{ij} \cdot pr^l + \sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{j \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{g \in \mathcal{G}} x_{ij}^k \cdot \phi^{gk} \cdot d_{ij} \cdot pr^k \end{aligned}$$

Ecuación N° 48

5. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

La formulación matemática 2E-CLRP fue modelada y resuelta computacionalmente con FICO Xpress IVE 8.11 y el “solver” Xpress, mediante una licencia académica. Igualmente, se utilizó un computador con un procesador Intel Core i5 de 2.6 GHz, 8 GB de memoria RAM y disco duro de estado sólido de 480 GB (SSD).

5.1. Experimentos

Los datos utilizados en la experimentación son los mismos empleados en el modelo 2E-CWLPwTr desarrollado por San Martín (2020), agregándose los siguientes valores de parámetros:

Valores de los parámetros utilizados											
VT^f	:	200	VT^m	:	100	$(te)_i^g$:	1	$(tl)_i^g$:	48
		toneladas			toneladas			hora			horas

Tabla N° 4 “Parámetros adicionales a la formulación 2E-CLRP”.

Fuente: Elaboración propia.

La situación evaluada se basa en un despliegue ficticio en la Región de Antofagasta, 20 km al Este de la ciudad de Antofagasta, en una zona de 170 km de ancho y 220 km de

profundidad, con sentido de apoyo desde el Norte al Sur. En dicho sector, se despliegan 15 unidades de combate, unidades fundamentales independientes y secciones las que se encuentran encuadradas en una brigada acorazada y una brigada motorizada. Por lo tanto, la división a la que pertenecen ambas brigadas tiene tres sitios posibles (candidatos) en los cuales localizar sus instalaciones. Igualmente, se han identificado cuatro sitios candidatos para activar los puestos de transbordo, en este caso, coordinado por cada brigada y, en los cuales, la división abastecerá a las unidades de combate.

La asignación numérica de los sitios candidatos a instalaciones divisionarias y puestos de transbordo, así como de las unidades de combate desplegadas en el terreno se presenta a continuación:

Instalaciones Divisionarias (Sitio)		Puestos de Transbordo (PT)	
Número de Unidad	Tipo de Unidad	Número de Unidad	Tipo de Unidad
1	Sitio Candidato 1	4	PT Candidato 1
2	Sitio Candidato 2	5	PT Candidato 2
3	Sitio Candidato 3	6	PT Candidato 3
		7	PT Candidato 4

Tabla N° 5 “Asignación numérica a las instalaciones logísticas divisionarias y puestos de transbordo”.

Fuente: Elaboración propia.

Brigada Acorazada		Brigada Motorizada	
N° de Unidad	Tipo de Unidad	N° de Unidad	Tipo de Unidad
8	Pelotón de Telecomunicaciones	16	Grupo de Artillería
9	Batallón de Infantería	17	HQ de Brigada
10	Grupo de Artillería	18	Batallón de Infantería
11	Compañía de Ingenieros	19	Compañía Logística
12	Compañía Logística	20	Grupo de Tanques
13	HQ de Brigada	21	Compañía de Ingenieros
14	Grupo de Tanques	22	Pelotón de Telecomunicaciones
15	Batallón de Infantería		

Tabla N° 6 “Asignación numérica a las unidades desplegadas”.

Fuente: Elaboración propia.

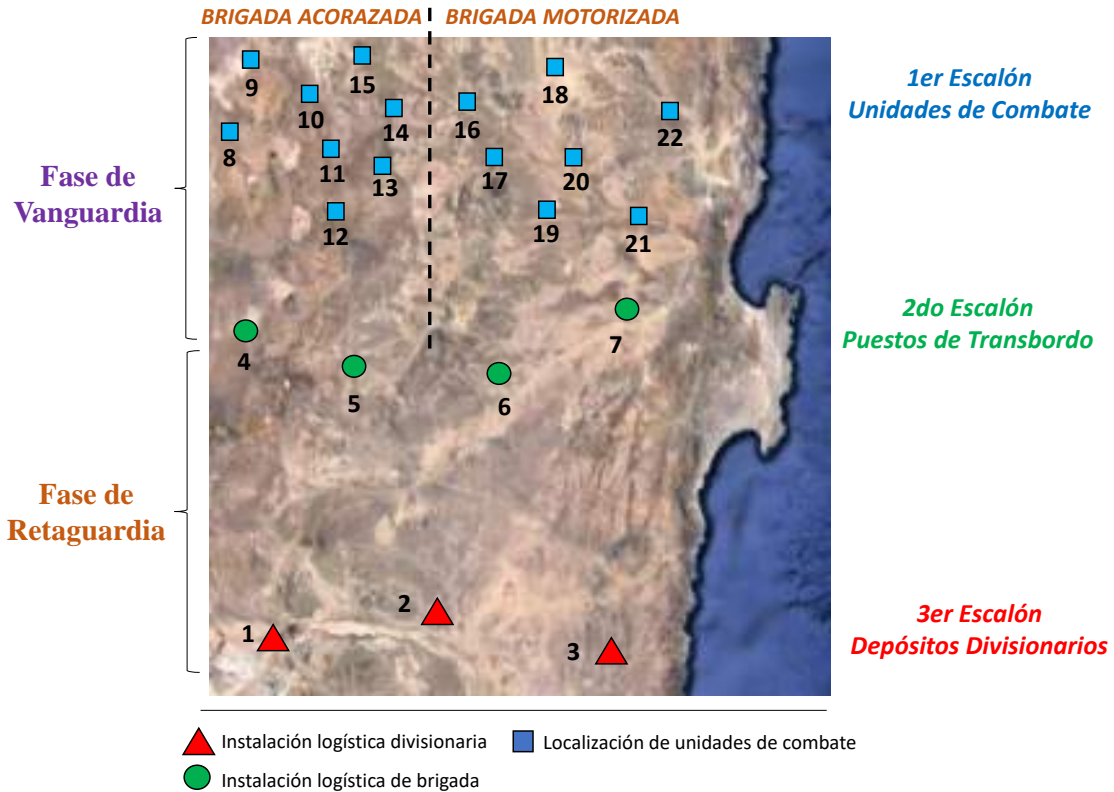


Figura N° 2 “Distribución geográficas de las unidades”.
(Fuente: Google Maps – Elaboración propia)

5.2. Resultados del modelo 2E-CLRP

Los resultados para los tres escenarios utilizados en este estudio se presentan en la tabla N°7 para la demanda de alta intensidad, en la tabla N°8 para demanda de intensidad media y en la tabla N°9 para demanda de baja intensidad. Además, en la tabla N°10 se presentan los costos totales, fijos y de transporte.

Retaguardia			Número de Camiones			
Origen	Circuito	Distancia (km)	Munición	Agua	Raciones	Combustible
2	4	230	3	1	1	3
	5	166	2	1	1	3
	7	234	4	2	1	4
Vanguardia			Número de Camiones			
Origen	Circuito	Distancia (km)	Munición	Agua	Raciones	Combustible
4	14 – 12	193	7	2	2	6
	8 – 9 – 13	196	6	2	2	5
5	15 – 10 – 11	177	8	3	2	7
7	17 – 16 – 20	152	6	3	2	6
	21 – 22 – 18 – 19	195	6	2	2	4

Tabla N° 7 “Resultados en escenario de alta intensidad”.

Fuente: Elaboración propia.

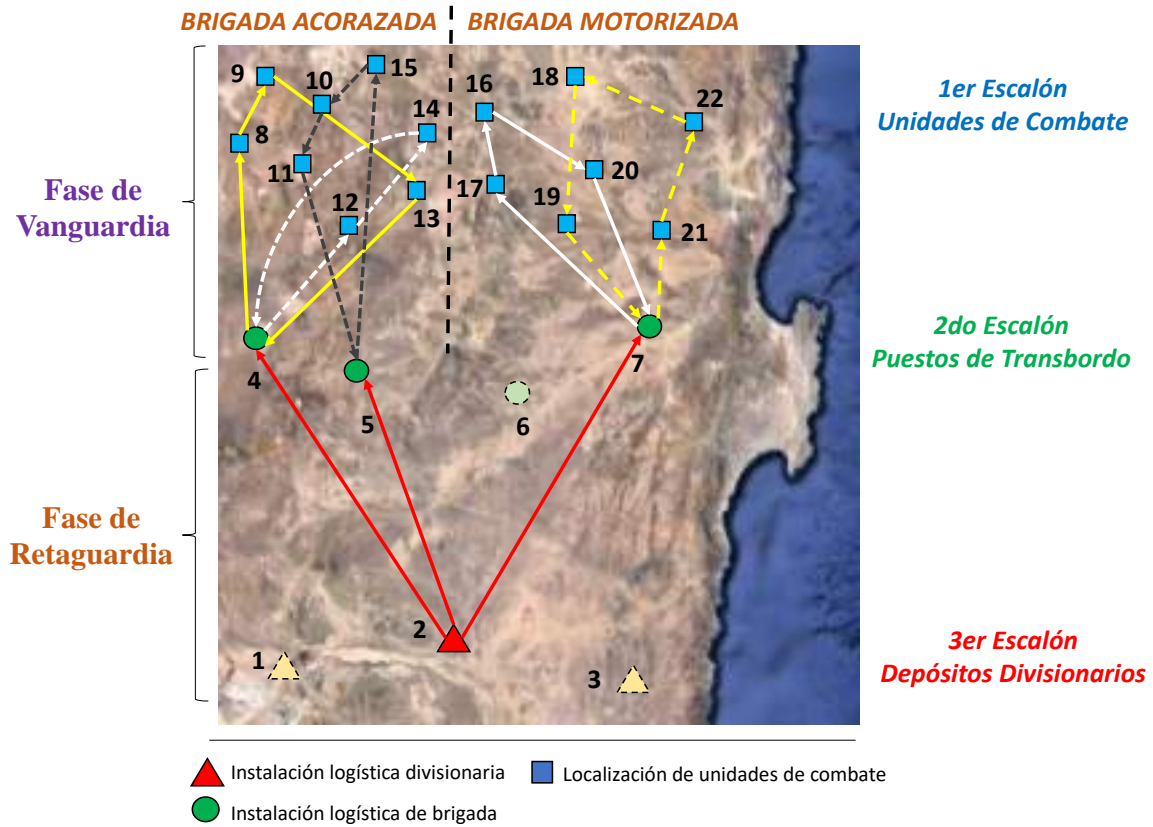


Figura Nº 3 “Solución logística para demanda de alta intensidad”.
(Fuente: Google Maps – Elaboración propia)

Retaguardia			Número de Camiones			
Origen	Circuito	Distancia (km)	Munición	Agua	Raciones	Combustible
2	4	230	4	2	1	4
	7	234	3	2	1	3

Vanguardia			Número de Camiones			
Origen	Circuito	Distancia (km)	Munición	Agua	Raciones	Combustible
4	13 – 14 – 9 – 8	224	8	3	2	6
	10 – 11 – 15 – 12	158	6	3	2	6
7	17 – 16 – 20	119	3	2	2	4
	21 – 22 – 18 – 19	199	8	3	2	4

Tabla Nº 8 “Resultados en escenario de media intensidad”.
Fuente: Elaboración propia.

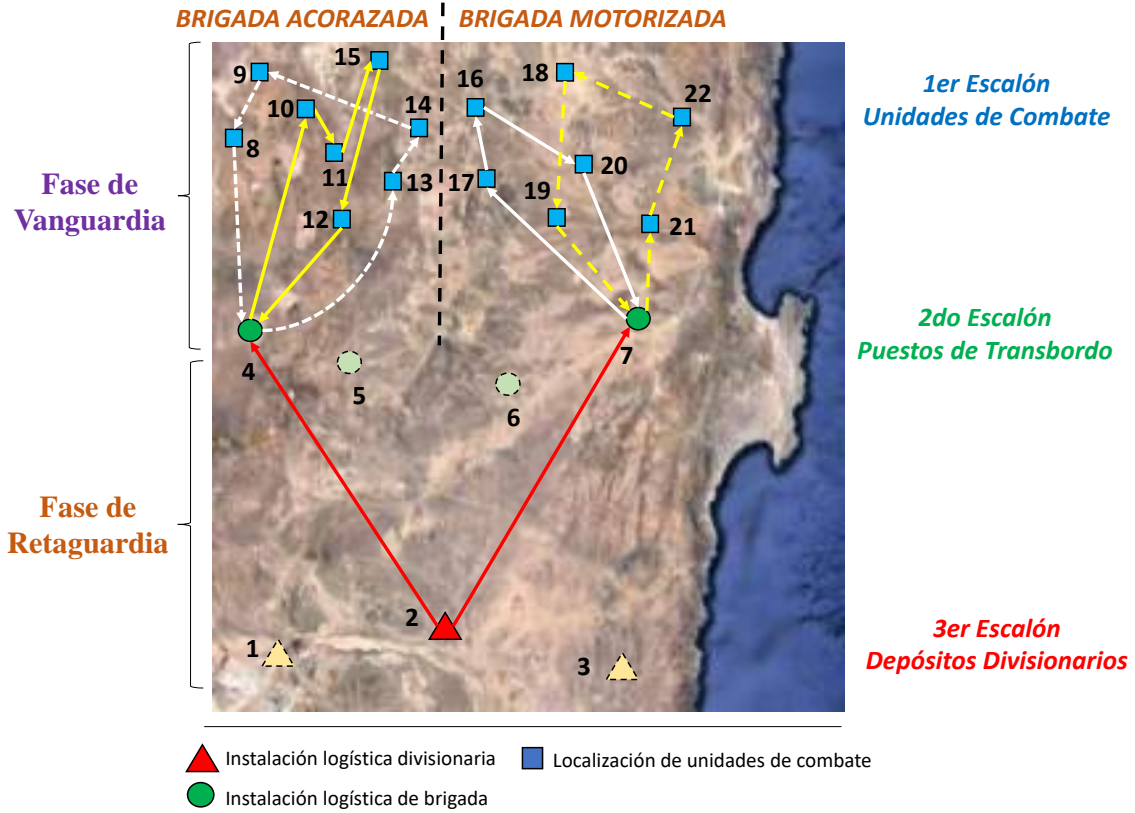


Figura N° 4 “Solución logística para demanda de media intensidad”.
(Fuente: Google Maps – Elaboración propia)

Retaguardia			Número de Camiones			
Origen	Circuito	Distancia (km)	Munición	Agua	Raciones	Combustible
2	4	230	2	2	1	2
	7	234	2	2	1	2

Vanguardia			Número de Camiones			
Origen	Circuito	Distancia (km)	Munición	Agua	Raciones	Combustible
4	11 – 10 – 9 – 8	185	4	3	2	2
	14 – 15 – 13 – 12	195	3	3	2	3
7	19 – 17 – 16 – 18	169	4	3	2	2
	21 – 22 – 20	199	2	2	2	2

Tabla N° 9 “Resultados en escenario de intensidad baja”.
Fuente: Elaboración propia.

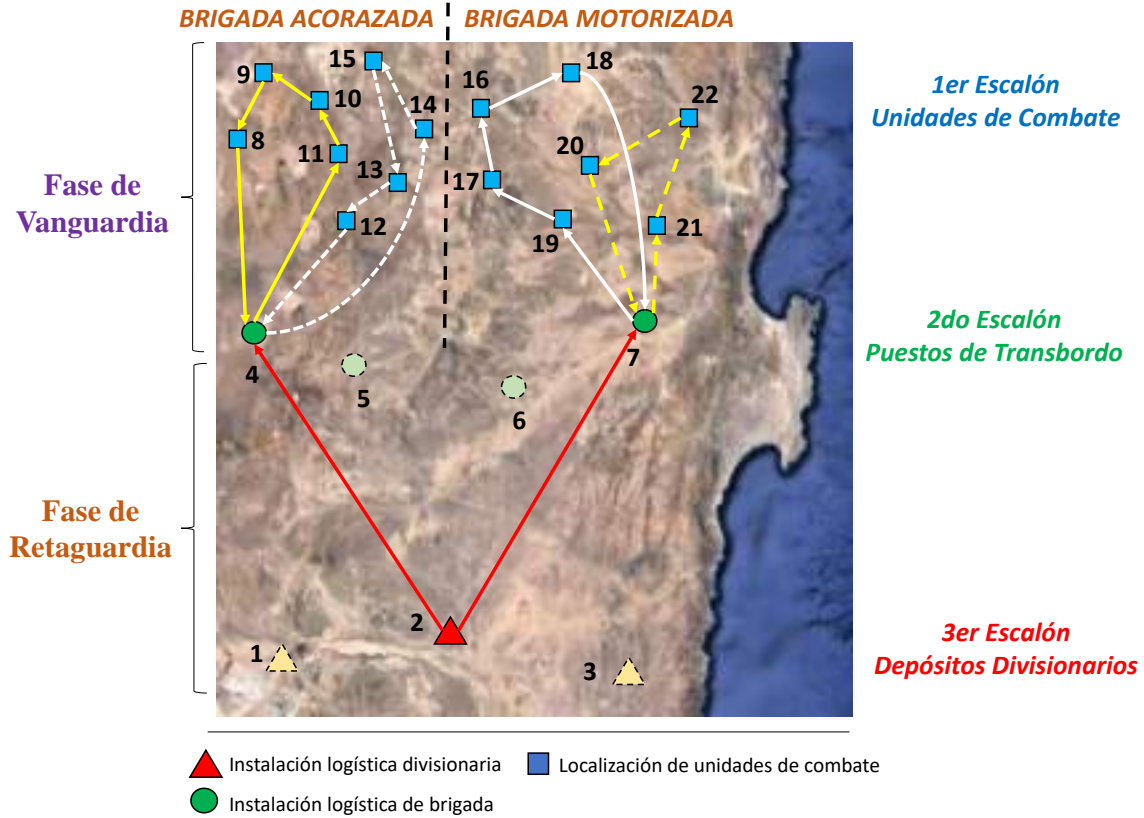


Figura N° 5 “Solución logística para demanda de baja intensidad”.
(Fuente: Google Maps – Elaboración propia)

A partir de los resultados de los modelos de 2E – CLRP se puede observar que el escenario de alta intensidad, el cual requiere una mayor cantidad de clases logísticas para las unidades de combate, fuerza al modelo a la apertura de tres puestos de transbordo, debido a que la demanda es muy alta y hay una disponibilidad limitada de vehículos y tiempos para realizar los recorridos.

Intensidad de Demanda vs Costo (M USD)			
Costo	Alta (A)	Media (M)	Baja (B)
Fijo	498	482	482
Transporte	4.348	3.468	1.953
Total	4.846	3.950	2.435

Tabla N° 10 “Costos de abastecimiento en diversos escenarios”.
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N°11, se presenta la brecha de optimalidad obtenida en tres periodos de tiempo utilizados para la resolución del modelo. A base de estos resultados, se podría concluir inicialmente que no se alcanzó la solución óptima. Sin embargo, dicho resultado

debe ser interpretado como la imposibilidad del “Solver” de garantizar que la solución lineal – entera mixta (MIP) propuesta sea la óptima, pues no se produjo una convergencia entre la relajación lineal y la solución entera encontrada.

Tiempo de ejecución vs Brecha de optimalidad (%)			
Demanda	15 min	60 min	120 min
Alta	24,79	19,61	18,91
Media	10,51	9,51	9,11
Baja	11,97	9,85	9,65

Tabla N° 11 “Brecha de optimalidad asociada a los escenarios”.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la tabla N°12, se presenta la comparación entre los resultados de la formulación 2E – CWLPwTr, propuesta por (San Martín, 2020) y la formulación 2E – CLRP desarrollada y expuesta en este artículo. Es destacable que, incluso sin haberse garantizado la obtención de la solución óptima, el porcentaje de mejora entre ambas formulaciones, medida como recursos ahorrados, es notoria. Lo anterior, implica que la formulación 2E – CLRP permite un uso más eficiente de los recursos disponibles, siempre y cuando la situación táctica lo permita.

Demanda	2E – CWLPwTr (M USD)	2E – LRP (M USD)	Mejora (%)
Alta	6.380,12	4.845,99	24,05
Media	5.410,4	3.950,14	26,99
Baja	3.919,16	2.434,61	37,88

Tabla N° 12 “Comparación de resultados entre modelo 2E – CWLPwTr y 2E – CLRP”.

Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. Conclusiones

La formulación 2E-CLRP tiene como propósito tanto la localización de instalaciones logísticas (WLP) como la estructuración de circuitos de abastecimiento mediante la formulación de ruteo de vehículos (VRP), lo cual demostró ser más eficiente, desde la perspectiva del uso de los recursos, que la formulación 2E – CWLPwTr.

La formulación presentada tiene la debilidad que no garantiza que la solución encontrada sea la óptima para instancias de mediano tamaño, en tiempos menores a dos

horas, lo que puede ser mejorado con una mejor formulación o el uso de heurísticas que permitan encontrar una solución inicial de calidad y descartar soluciones no factibles que sean exploradas inútilmente.

La flexibilidad de las formulaciones para el problema combinado de localización de instalaciones y ruteo de vehículos permite que el asesor logístico pueda variar las restricciones y su función objetivo, incorporando nuevas necesidades o reorientando aquellas modeladas, de manera simple, lo que incluso le puede permitir combinar distintos tipos de problemas.

Finalmente, en caso de utilizarse una formulación que, por su tamaño y estructura, no garantice saber si la solución factible obtenida es la óptima, en el tiempo requerido, se podrá agregar una condición de término del proceso computacional en un tiempo dado, utilizando la solución obtenida hasta ese momento. Si bien, no es el curso de acción más adecuado, constituye una alternativa simple que puede ser implementada si es que no se ha reformulado este problema.

6.2. Futuras líneas de trabajo

La primera línea de investigación a explorar es una formulación del problema en el que algunos parámetros estén sujetos a incertidumbre, sea bajo una modalidad estocástica o robusta. Esta variación le brindará al modelo una mayor capacidad de entregar soluciones que se adapten de mejor forma a la realidad. Los modelos bajo incertidumbre son aplicables tanto al modelo 2E – CLRP como al 2E – CWLPwTr.

La segunda línea de investigación corresponde a la reformulación del problema, de manera tal que la convergencia a la solución óptima, y su comprobación, sea más rápida de lo que actualmente es. Lo anterior es relevante debido a que una formulación 2E – CLRP con medidas de incertidumbre, por ejemplo, estocástica basada en escenarios, se volvería aún más “pesada”, desde el punto de vista de la complejidad de resolución, convergiendo aún más lento.

La tercera línea de investigación corresponde a la necesidad de combinar el problema de localización y ruteo de vehículos con el problema de gestión de inventarios. Tal como se plantea en la segunda línea de investigación, es necesario, junto con la inclusión de este problema, realizar la reformulación del problema para hacer más eficiente la solución del problema.

Finalmente, la cuarta línea de investigación se relaciona con la implementación de una formulación multi – periodo, que evalúe la solución logística no solo de forma estática,

en un momento de tiempo determinado, sino que, en dos o más periodos de tiempo, conforme a la variación de la situación táctica del momento.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambrosino, D., & Scutella, M. (2005). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 610 - 625.
- Baldacci, R., Mingozzi, A., Roberti, R., & Wolfler Calvo, R. (2013). An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Operations Research*, 61(2), 298 - 314.
- Boccia, M., Crainic, T., Sforza, A., & Sterle, C. (2010). A metaheuristic for a two-echelon location-routing problem. *Experimental Algorithms: 9th International Symposium, SEA 2010* (pp. 288 - 301). Naples, Italy: Paola Festa.
- Boccia, M., Crainic, T., Sforza, A., & Sterle, C. (2011). *Location-routing models for designing a two-echelon freight distribution system*. Quebec, Canada: CIRRELT.
- Dantzig, G., Fulkerson, G., & Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(4), 393 - 410.
- Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1959). On a linear-programming, combinatorial approach to the traveling-salesman problem. *Operations Research*, 7(1), 58 - 66.
- Desaulniers, G., Madsen, O., & Ropke, S. (2015). Chapter 5: The vehicle routing problem with time windows. In *Vehicle Routing* (pp. 119 - 159). SIAM.
- Jepsen, M., Spoorendonk, S., & Ropke, S. (2013). A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Transportation Sciences*, 1, 23 - 37.
- Miller, C., Tucker, A., & Zemlin, R. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problem. *J. ACM*, 7(4), 326 - 329.
- Periboli, G., Tadei, R., & Vigo, D. (2011). The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics. *Transportation Sciences*, 45(3), 364 - 380.
- Perl, J., & Daskin, M. (1985). A warehouse location-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 19(5), 381 - 396.
- San Martín, L. (2020). Modelo de localización de instalaciones y distribución logística en el campo de batalla. *Boletín Científico - Tecnológico N°24*, 15 - 34.
- Semet, F., Toth, P., & Vigo, D. (2015). Chapter 2: Classical exact algorithm for the capacitated vehicle routing problem. In *Vehicle Routing* (pp. 37 - 57). SIAM.

Toyoglu, H., Karasan, O. E., & Kara, B. Y. (2011). Distribution network design on the battlefield. *Naval Research Logistics*, 58(3), 188 - 209.

Toyoglu, H., Karasan, O. E., & Kara, B. Y. (2012). A new formulation approach for location-routing problems. *Networks*, 12(4), 635 - 659.

DISEÑO PRELIMINAR DE UN SISTEMA DE TRASLADO PARA CAÑONES DE RECAMBIO DEL ARMAMENTO SECUNDARIO Y FUSILES DE LA TRIPULACIÓN DEL TANQUE LEOPARD 2A4

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2020

Fecha de aceptación: 29 de febrero de 2021

MAY. Cristián Barra Mora¹

Resumen: *La presente investigación busca dar una alternativa de solución al problema de las unidades blindadas del Ejército, con relación a la limitada capacidad de traslado que existe para los fusiles de la tripulación y los cañones de recambio del armamento secundario, mientras el tanque Leopard 2A4 se encuentra en operación.*

Para lograr lo anteriormente señalado, la investigación se realizó bajo un enfoque cuantitativo. En una primera parte se utilizó una metodología descriptiva analítica para la recopilación y análisis de información, además de la descripción del problema. En segundo lugar, la investigación utilizó ingeniería de sistemas para lograr entender las necesidades de los usuarios y diseñar el sistema.

Finalmente, se logró obtener un diseño preliminar de un sistema para traslado de cañones de recambio de las ametralladoras y fusiles de la tripulación para el tanque Leopard 2A4.

Palabras claves: *Aleaciones aluminio, tanque Leopard 2A4, protección de armamento.*

PRELIMINARY DESIGN OF A TRANSFER SYSTEM FOR REPLACEMENT BARRELS OF THE SECONDARY ARMAMENT AND RIFLES OF THE LEOPARD 2A4 TANK CREW

Abstract: *The current research seeks to provide an alternative solution to the problema of the armored units of the Army, in relation to the limited portability that exists for crew rifles and cannons replacement of secondary armament while the Leopard 2A4 tank is in operation.*

In order to achieve the aforementioned, the research was conducted under a quantitative approach. In the first part, an analytics descriptive methodology was used for the collection and analysis of information, in addition to the description of the problem. Second, the research used systems engineering to understand the requirements needs of the users and to design the system. Finally, a preliminary design of a system for transferring spare barrels for the machine guns and rifles of the crew for the Leopard 2A4 tank, was obtained.

Keywords: *Aluminium Alloy, Leopard 2A4, weapon protection.*

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas Logísticos mención Armamento de la Academia Politécnica Militar. Email: cbarra@acapomil.cl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7448-6782>.

1. INTRODUCCIÓN

El Grupo Blindado N° 9 “Vencedores”, perteneciente a la Fuerza Terrestre del Ejército de Chile, específicamente a la 1ra. Brigada Acorazada “Coraceros”, manifiesta la problemática que se suscita al operar el tanque Leopard 2A4, en lo referido al traslado en el interior del tanque de los fusiles de asalto liviano de cargo de cada uno de sus tripulantes. Esto sucede debido a que los fusiles tienen dimensiones inapropiadas para ser afianzados a la estructura interior de la torre del tanque, ya que el soporte para el armamento individual está diseñado para transportar una subametralladora y no un fusil, siendo trasladados en lugares no pensados para este fin. Además, el requerimiento de la unidad de combate hace mención que los cañones de recambio del armamento secundario del tanque, correspondiente a dos ametralladoras MG3 de configuraciones antiaérea y coaxial, cuentan con un compartimiento original diseñado para trasladarlos en su estuche original. Sin embargo, al momento de realizar el procedimiento de cambio del cañón de la ametralladora antiaérea (sobre el techo de la torre), este compartimiento se encuentra alejado del armamento, por lo que el municionero debe introducirse al interior de la torre y luego tomar su posición original para cambiar el cañón. Este movimiento ralentiza el procedimiento, lo que lleva a que el operador de la ametralladora pueda dejar caer al suelo el cañón que está siendo cambiado; al no quedar este último en el suelo y no afianzado, existe un alto riesgo de que sea atrapado por el poderoso giro de la torre¹ y así ser irremediamente dañado por deformación plástica. La pérdida de un componente del sistema de fuego del tanque puede no sólo provocar un problema de no operacionalidad de material de guerra, sino que, en caso de combate, pone en riesgo la supervivencia de la tripulación al no contar con armamento para hacer frente a las amenazas de infantería, helicópteros y armas antitanque.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación tuvo un enfoque cuantitativo en su desarrollo. En una primera parte, la metodología que se utilizó fue de tipo descriptiva analítica, ya que se recopiló información a través de una revisión a la bibliografía institucional acerca de componentes del tanque y procedimientos de la tripulación. Lo anterior con la finalidad de correlacionar ambos tipos de información para entender el problema y analizar los espacios útiles donde se incorporará el sistema para traslado de cañones de recambio y fusiles de la tripulación en el tanque Leopard 2A4.

A su vez, la investigación principal se basó en “Ingeniería de Sistemas”, lo que permitió realizar una investigación secuencial y estructurada en la obtención de la arquitectura, subsistemas, componentes, desempeño funcional y técnico del sistema antes mencionado.

¹ Corona de torre: interfaz electromecánica que une el chasis con la torre del tanque, permitiendo su giro en 360°.

3. DESARROLLO

Para entender mejor el problema, se realizó una reunión técnica con personal especialista en la que se analizaron los procedimientos realizados por la tripulación y, junto con la revisión de la bibliografía, se evidenció que componentes como la corona de torre y cañón del tanque pueden afectar tanto al armamento secundario del vehículo como al armamento individual de la tripulación. El primero de estos componentes, puede causar deterioro en el armamento antes mencionado, ya que este mecanismo permite el giro en 360° de la torre sobre el chasis del tanque. El segundo componente afecta a los fusiles, ya que es en la cuna del cañón de 120 mm donde la tripulación, generalmente, traslada su armamento individual. Otro aspecto importante analizado fueron los espacios utilizables para una posible solución, tanto en el interior como en el exterior del tanque.

3.1. Obtención de los requerimientos técnicos del sistema

Del análisis de la necesidad del usuario, se identificaron los requerimientos de alto nivel llamados en la doctrina del Ejército como “Requerimientos de Estado Mayor”. Posteriormente, estos requerimientos se desagregaron en requerimientos funcionales del sistema, llamados “Requerimientos Operacionales”, cuyas medidas de desempeño permiten cuantificar los requerimientos que dan solución a la necesidad del usuario.

La redacción de estos requerimientos operacionales está dada por la siguiente estructura:

SISTEMA + META/RESTRICCIÓN + FUNCIÓN + MEDIDA DE DESEMPEÑO

Cabe señalar que la meta y la restricción en un requerimiento están dadas por la criticidad de este, siendo redactados como “debería” y “deberá”, respectivamente. Así, los Requerimientos Operacionales resultaron ser los siguientes:

- Requerimiento N°1: El sistema deberá resistir las vibraciones generadas por el movimiento del tanque correspondiente a $0,274 \text{ m/s}^2$.
- Requerimiento N°2: El sistema deberá transportar fusiles de cargo en el Ejército de las siguientes dimensiones de 790 x 235 x 85 mm.
- Requerimiento N°3: El sistema deberá transportar los fusiles de toda la tripulación correspondientes a 4 fusiles de asalto liviano.
- Requerimiento N°4: El sistema deberá resistir, en caso de que esto estuviese fuera de la cabina, penetraciones de proyectiles de calibre 7,62 mm.
- Requerimiento N°5: El sistema deberá resistir la temperatura del cañón de ametralladora de 300 °C.

- Requerimiento N°6: El sistema deberá operar en ambiente de oscuridad sin la utilización de luz eléctrica.
- Requerimiento N°7: El sistema deberá reducir la distancia entre el municionero y el cañón de recambio de la ametralladora de torre a 1 m.
- Requerimiento N°8: El sistema deberá resistir una variación de temperatura ambiental entre -15 y 27°C.
- Requerimiento N°9: El sistema deberá resistir precipitaciones correspondientes a 200 mm anuales.
- Requerimiento N°10: El sistema deberá ser integrado al tanque sin perforar ni dañar su blindaje.
- Requerimiento N°11: El sistema deberá aumentar la silueta del tanque en un máximo de 500 mm.
- Requerimiento N°12: El sistema debería ser fabricado por la industria militar nacional.
- Requerimiento N°13: El sistema debería ser considerado en los procedimientos técnicos de la doctrina blindada del Ejército.
- Requerimiento N°14: El sistema debería ser desmontable sin desarmar su estructura.
- Requerimiento N°15: El sistema debería ser considerado en el mantenimiento nivel usuario del tanque de LIM 1.

Las medidas de desempeño de los Requerimientos Operacionales fueron desagregadas a través de la herramienta de la metodología “Despliegue de la Función Calidad”, denominada “Casa de la Calidad”, ver Figura N°1.

Medida de desempeño		Meta										
		↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	0	
		Priorización	Dimensiones (largo)	Dimensiones (ancho)	Material (tratamiento térmico)	Ubicación del compart. Cañones	Material (blindaje)	Amortiguación	Dimensiones sobre la torre	Propiedades mecánicas	Protección	Iluminación no eléctrica
Fusiles	Transporte de fusiles 1m de largo	5	●			○						
	Transporte de 4 fusiles	3		●		○						
Cañones	Resistir T° cañón de 300°C	5			●					●		
	Distancia entre ametr. y compartimento menos de 1 m	3				●				○		
Sistema	Resistir penetración de mun. 7,62 mm	5			○	○	●			●		
	Resistir vibraciones	5			●	△		●		●		
	Silueta máximo 50 cm	3							●			
	Resistir temperatura entre	3			●	△				●		
	Resistir humedad de	1				●					●	
	Operar en oscuridad sin luz artificial	1				△						●
Valorización de la especificación del objetivo												
Dificultad técnica		25	15	80	68	25	25	25	99	5	5	TOTAL 372
Importancia		6,7	4	21,5	18,3	6,7	6,7	6,7	26,6	1,3	1,3	%

●	5
○	3
△	1

Figura N° 1: “Casa de la Calidad”

Fuente: Elaboración propia.

Una vez desagregadas las medidas de desempeño, se obtuvo las “Medidas de Prestaciones Técnicas”, las que entregan los parámetros técnicos del sistema y que permiten cuantificar los Requerimientos Técnicos del Sistema.

Requerimientos Técnicos del Sistema

- Requerimiento N°1: El sistema deberá transportar fusiles en un componente de un largo superior a 790 mm.
- Requerimiento N°2: El sistema deberá transportar los cuatro fusiles de la tripulación en un componente de un ancho igual o superior a 890 mm.
- Requerimiento N°3: El sistema deberá ser construido con material con tratamiento térmico superior a 300°C para transportar los cañones de recambio usados.
- Requerimiento N°4: El sistema deberá tener una distancia igual o inferior a 1 m entre la ametralladora y el compartimiento del cañón de recambio.
- Requerimiento N°5: El sistema deberá proteger de penetraciones de proyectiles de calibre 7,62 x 51 mm NATO hasta 50 mm de espesor del material.
- Requerimiento N°6: El sistema deberá estar compuesto de un material resistente a las vibraciones del tanque de $0,274 \text{ m/s}^2$.
- Requerimiento N°7: El sistema deberá tener un alto inferior a 500 mm sobre la torre del tanque.
- Requerimiento N°8: El sistema deberá tener una estructura mecánica que permita soportar variaciones de temperatura de -15 y 27°C .
- Requerimiento N°9: El sistema deberá estar fabricado con material anticorrosivo que resista precipitaciones de 200 mm anuales y las condiciones de salinidad del terreno que puedan producir corrosión.
- Requerimiento N°10: El sistema deberá operar en condiciones de oscuridad con un material fluorescente u otro a fin de evitar el uso de energía eléctrica.

3.2. Arquitectura del Sistema

En esta investigación, la arquitectura solución se definió como un sistema basado en dos subsistemas que permitieran el traslado de los fusiles de la tripulación y de los cañones de recambio del armamento secundario del tanque, a base de un componente de traslado para los fusiles de la tripulación y de dos componentes de traslado de cañones de recambio del armamento secundario del tanque, ver Figura N°2. Se determinó que el primero de ellos es el que traslade los dos cañones de recambio de la ametralladora coaxial del tanque. Mientras que el segundo, lo haría con el cañón de recambio de la ametralladora de torre. La justificación más importante de separar este subsistema en dos componentes fue que las ametralladoras se encuentran separadas entre sí y se debe dar solución al requerimiento de

reducir la distancia entre la ametralladora de torre y el compartimiento que lo traslada en la actualidad. Esta separación permitía cumplir con el requerimiento operacional y requerimiento técnico de disminuir la distancia entre los cañones de recambio y la ametralladora a una distancia lineal de máximo un metro.

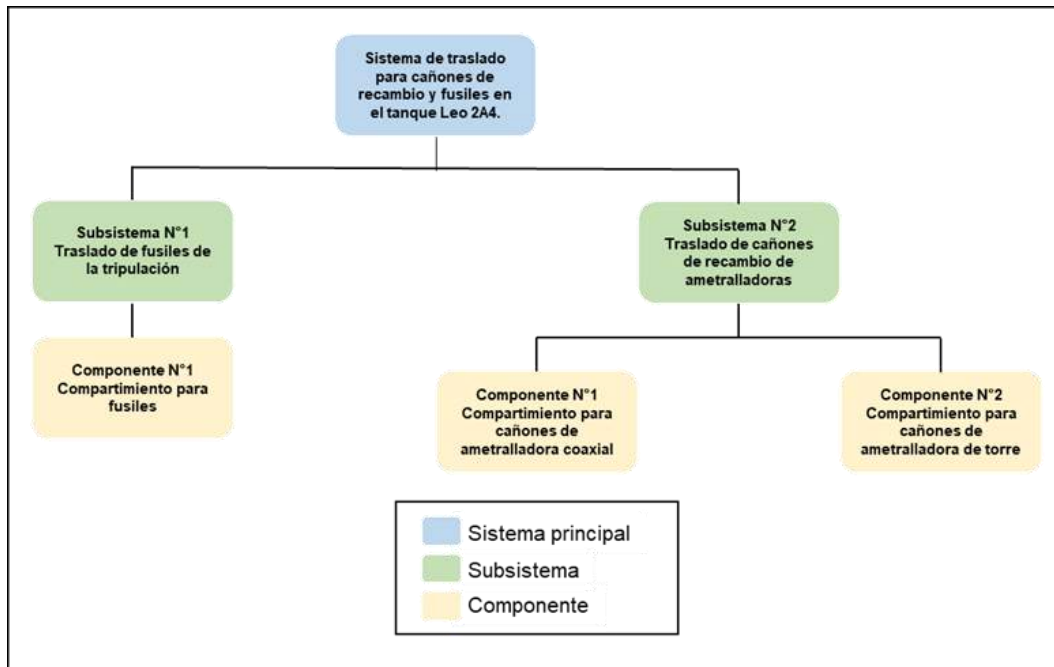


Figura N° 2: Arquitectura del sistema”

Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que el compartimiento para cañones de recambio de la ametralladora coaxial se mantuvo en el original diseñado para el tanque, es decir, donde se trasladan los cañones actualmente. Esto, ya que se determinó que los cañones de la ametralladora coaxial no presentaban problemas como los cañones de la ametralladora de torre.

3.3. Diseño del Sistema

3.3.1. Diseño del compartimiento para fusiles

Para diseñar el componente N°1 “Compartimiento para fusiles”, se seleccionó el material que reuniera las características físicas para dar satisfacción a los requerimientos, en especial, al de ser resistente a la penetración de proyectiles calibre 7,62 mm. Para esto, se realizó una revisión bibliográfica de los metales que están siendo utilizados en la industria armamentista, específicamente en la protección de vehículos blindados. En esta revisión bibliográfica se destacaron las aleaciones de aluminio, con tratamientos térmicos específicos y que proveen de un alto grado de protección, con espesores y pesos menores a otros metales.

Las aleaciones escogidas para su estudio, por sus propiedades mecánicas y sobre todo balísticas fueron: AA 7039, AA 5456, AA 5083 y AA 5059.

Las propiedades mecánicas de las aleaciones comparadas fueron obtenidas como parámetros mínimos que deben cumplir para aplicaciones de blindaje militar, definidos por el US Army Research Laboratory (ARL), ver Tabla N°1.

Aleación	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Elongación (%)
AA 7039	351,63	413,69	9
AA 5456	241,32	310,26	8
AA 5083	241,32	310,26	8
AA 5059	303,37	393	8

Tabla N° 1: “Características mecánicas de las aleaciones”

Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades balísticas de las aleaciones candidatas para ser el material con el que se diseñará el compartimiento de los fusiles, fueron obtenidas a través de pruebas balísticas realizadas por el ARL del ejército estadounidense, cuyos resultados permitieron establecer una información valiosa para la elección del material estructural del compartimiento, así como su espesor, ver Tabla N°2.

Parámetros	AA 7039	AA 5456	AA 5083	AA 5059
Espesor (mm)	50.8	50.1	50.8	50
V ₅₀ (m/s)	597	852	852	873

Tabla N° 2: “Características balísticas de las aleaciones”

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que la velocidad V₅₀ es “la velocidad de impacto calculada estadísticamente para en la cual se espera que el proyectil penetre completamente el blindaje el 50 por ciento de las veces”. También se define como la “velocidad en que el proyectil es detenido por el blindaje el 50 por ciento de las veces” (NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE, 1987, pág. 4)

Una vez analizados los materiales candidatos, se procedió a elegir el material a través de la herramienta computacional EXPERT CHOICE, teniendo como resultado la superioridad de la aleación AA5059 con un 58,9% de ponderación, ver Figura N°3.

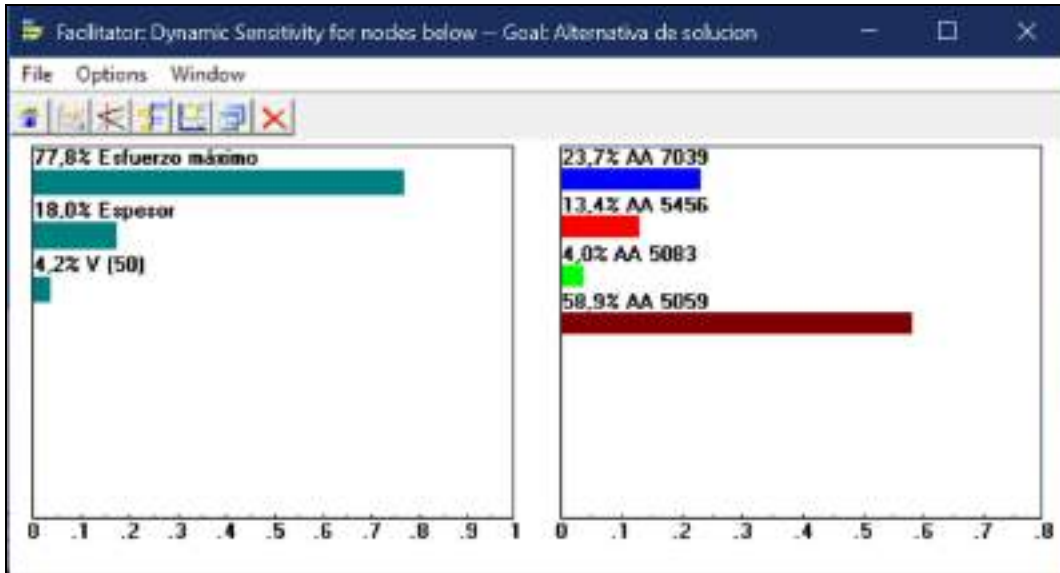


Figura N° 3: “Elección de material por EXPERT CHOICE”
 Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de las dimensiones del compartimiento, se utilizó como referencia el fusil GALIL ACE, ya que es aquel que tiene mayor largo entre los fusiles considerados para el uso en las unidades blindadas. El fusil Galil tiene 790 mm de largo, desde la boca del cañón hasta su culata y un alto de 240 mm desde el punto de mira hasta cargador. Cabe señalar que, en los requerimientos operacionales, el usuario definió que se deben trasladar cuatro fusiles de asalto, es decir, uno por cada integrante de la tripulación.

Parámetros	Dimensiones
Alto	200 mm
Ancho	900 mm
Largo	850 mm
Espesor	50 mm

Tabla N° 3: “Dimensiones del compartimiento para fusiles”
 Fuente: Elaboración propia.

En el interior del compartimiento de fusiles se consideró la utilización de una espuma acústica de poliuretano de alta densidad y celda cerrada, para la sujeción de los fusiles con adaptación a la forma de estos, permitiendo así traslado de cualquier tipo de fusil, sin la necesidad de cambiar las dimensiones del compartimiento. Además, la espuma entrega hermeticidad al compartimiento logrando con ello, resguardar la integridad física de los fusiles, respecto a factores climáticos y geográficos como lo son el polvo fino llamado chusca o las precipitaciones que caen en distintos períodos del año en la zona de acción táctica del grupo blindado.

Para la iluminación del sistema en ambiente de oscuridad, se eligió el tritio², cuyo gas permite una iluminación permanente de 10 años aproximadamente, sin la necesidad del uso de electricidad o baterías. Es importante destacar que, aunque sea un isótopo radiactivo, el tritio es inofensivo en pequeñas cantidades.

En cuanto a la ubicación donde se integraría en el tanque el compartimiento de fusiles, considerando las dimensiones tanto internas como externas de la torre, y el procedimiento de combate en tierra donde se involucra el uso de los fusiles por parte de la tripulación, se determinó que el compartimiento tenía que integrarse al tanque en el exterior de la torre; ello permite transportar los cuatro fusiles de la tripulación, en un lugar despejado y que permitiera el rápido equipamiento de la tripulación en caso de tener que hacer abandono del tanque. El lugar para el compartimiento de los fusiles de la tripulación fue en el sector posterior sobre la torre, específicamente detrás de la posición del municionero mirado desde el frente, sobre la tapa del búnker de alvéolos de munición de la torre del tanque; de esta manera, se cuenta con espacio suficiente para trasladar los cuatro fusiles de la tripulación y con pernos que pueden ser utilizados como anclaje del compartimiento, a fin de cumplir con el requerimiento crítico del usuario de no integrar el sistema perforando la superficie del tanque.



Figura N° 4: “Elección de lugar del compartimiento para fusiles”

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al anclaje del compartimiento al tanque, se consideró el uso de los mismos pernos que sujetan la tapa del búnker de munición de la torre, ya que estos están fabricados para ser fracturados en cizalle³ y así liberar presión ejercida en caso de que se produzca la explosión de la munición de guerra que el tanque traslada al interior de la torre.

² Tritio: isótopo de hidrógeno H^3 que es encapsulado en tubos de gas y en una capa de fósforo para lograr su luminiscencia.

³ Cizalle: cuando una pieza o estructura es sometida a un esfuerzo cortante, es decir, una resultante de fuerzas paralelas al plano de la sección.

3.3.2. Diseño del compartimiento para cañones de recambio

Para el diseño del compartimiento de los cañones de recambio del armamento secundario del tanque, se consideraron las siguientes aleaciones de aluminio como materiales candidatos para su construcción: 2024, 7075 y 6061. Estos materiales son ampliamente utilizados en la industria aeronáutica moderna, por sus propiedades mecánicas y térmicas. Otro material estudiado fue el cobre, el cual destaca por su conductividad térmica.

Las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales analizados fueron obtenidos de la empresa canadiense Alcan, fabricante de aleaciones de aluminio y que es referente mundial en el diseño y tratamiento de estos.

Parámetros	2024	6061	7075	Cobre
Conductividad térmica (W/mK)	121,07	164,31	129,72	400
Módulo elástico	10,6	10	10,4	8,2
Densidad (gr/cm ³)	2,8	2,71	2,77	8,96
Resistencia a la corrosión	mala	bueno	medio	bueno

Tabla N° 4: "Características mecánicas y térmicas de las aleaciones"

Fuente: Elaboración propia.

Las características de estos materiales fueron ponderados y analizados a través de la herramienta computacional EXPERT CHOICE, entregando como resultado, la superioridad de la aleación 6061 por sobre los otros materiales, con un 56,9% de ponderación. La resistencia mecánica y conductividad térmica son importantes para dar solución a los requerimientos del usuario.

Para determinación de las dimensiones del compartimiento, se analizó las dimensiones del cañón de recambio, ver Tabla N°5, con la finalidad de estar lo más ajustado al compartimiento, ya que esto permite la transferencia de calor por conducción por parte del cañón utilizado hacia el ambiente, con la finalidad de acelerar la disminución de la temperatura de este y del tiempo que necesita para ser utilizado nuevamente.

Cabe señalar que sólo se consideró el tubo del cañón, ya que la sección del cañón que se enlaza con el cierre se dejó fuera de la estructura, con la finalidad de facilitar su manipulación por parte del municionero.

Parámetros	Dimensiones cañón	Dimensiones compartimiento
Largo	500 mm	500 mm
Diámetro interno	7,7 mm	22 mm
Espesor	14,5 mm	5 mm

Diámetro total	22 mm	27 mm
----------------	-------	-------

Tabla N° 5: "Dimensiones del compartimiento para cañones"

Fuente: Elaboración propia.

En el espacio seleccionado para la instalación del compartimiento se encuentra el actual soporte para la subametralladora considerada originalmente en el diseño del tanque. Este cuenta con pernos que permitirían la instalación del soporte sin necesidad de perforar el blindaje. Además, tiene una separación de 10 cm de la torre, por lo que se pudo considerar la inclinación del diseño y así facilitar la incorporación o extracción del cañón al interior del compartimiento. Es importante señalar que los mismos pernos del soporte original se utilizarán para afianzar el compartimiento a la pared del tanque.

Además la ametralladora de torre cuenta con dos cañones, uno equipado en el armamento y otro de recambio. Es por esto, que el compartimiento fue considerado doble, con la finalidad de mantener uno de ellos vacío al momento de realizar el procedimiento de cambio de cañón. En este procedimiento, el cañón que está siendo cambiado se introducirá en el espacio vacío para que, una vez realizado este movimiento, el operador de la ametralladora pueda sacar el cañón sin utilizar para ser instalado en la ametralladora y con ello finalizar el procedimiento.



Figura N° 5: "Lugar de instalación del compartimiento"

Fuente: Elaboración propia.

El requerimiento del usuario referido a que el compartimiento de los cañones soporte la temperatura queda de manifiesto con la aleación de aluminio 6061, ya que su tratamiento térmico T6 le permite soportar temperaturas superiores a 500°C sin afectar su estructura molecular. Sin embargo, en el presente trabajo de investigación se buscó optimizar la transferencia de calor del cañón hacia el ambiente, con la finalidad de tener operativo el cañón en el menor tiempo posible.

Para esto se realizó el cálculo de transferencia de calor, en el compartimiento de los cañones, como se indica a continuación.

a) Cálculo de la resistencia conductiva del cañón.

Esta se calculó con la ecuación de resistencia por conducción a través de la fórmula:

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L}$$

donde,

r_1 = radio interior (0,00381 m)

r_2 = radio exterior (0,011 m)

L = longitud del cañón (0,5 m)

k_1 = conductividad térmica del acero (50 W/mK)

Lo que dio como resultado $R_1 = 0,0067 \text{ W/m}^2\text{K}$

b) Calculo de la resistencia conductiva del compartimiento.

Se calculó la resistencia conductiva del compartimiento utilizando la ecuación de resistencia conductiva del compartimiento.

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L}$$

donde,

r_1 = radio interior (0,011 m)

r_2 = radio exterior (0,012 m)

L = longitud del cañón (0,5 m)

k_1 = conductividad térmica del aluminio 6061 (164,31 W/mK)

Lo que dio como resultado $R_2 = 0,00017 \text{ W/mK}$

c) Calcular la resistencia convectiva del compartimiento.

Se calculó la resistencia convectiva del compartimiento, es decir, la capacidad de transferencia de calor de este hacia el ambiente. Para esto se utilizó la ecuación de resistencia convectiva.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}A}$$

donde,

h_{conv} = coeficiente de convección (3,477 W/mK)

A = área del compartimiento (0,012 m²)

Lo que dio como resultado $R_{conv} = 3,477$ W/mK

d) Cálculo de la resistencia de radiación del compartimiento

Para realizar este cálculo se utilizó la siguiente ecuación de resistencia por radiación:

$$R_{Rad} = \frac{1}{h_{Rad}A}$$

donde,

h_{Rad} = coeficiente de radiación (1,69 W/mK)

A = área del compartimiento (0,012 m²)

El resultado de este cálculo fue $R_{Rad} = 2,846$ W/mK

e) Cálculo de la resistencia total

Para calcular la resistencia total se sumaron las resistencias conductivas del cañón y la del compartimiento. Además de estas, se adicionaron las convectiva y de radiación.

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_{conv} + R_{rad}$$

Dando como resultado un $R_{total} = 2,853$ W/mK

Considerando la temperatura del cañón (300°C), se procedió a transformar el resultado del R_{total} en calor disipado por parte del compartimiento, obteniendo una transferencia de calor de 5572,74 (J/min), es decir, generando una temperatura de 240,54 °C en el compartimiento, reduciendo la temperatura del cañón en 59,4°C, transcurrido un minuto.

Para optimizar la transferencia de calor del cañón hacia el medio, se incorporaron 43 aletas circulares de 2 mm de espesor cada una y con una distancia de 10 mm entre ellas. El número de aletas se calculó respecto del espesor de estas y la separación entre cada una de ellas, considerando el largo de 500 mm del compartimiento. Con esto, se logró diseñar un disipador de calor que reduce la temperatura en 189,3 °C del cañón en un minuto, es decir,

129,8 °C más que el modelo del compartimiento sin aletas. Es importante señalar que este disipador de calor debe ser fabricado por extrusión⁴, es decir, en una sola pieza con la finalidad de mantener la continuidad del material y sus propiedades térmicas, al evitar soldaduras.

4. RESULTADOS

De los resultados obtenidos fue posible diseñar el sistema a base de dos subsistemas. Este diseño fue modelado en el software de ingeniería SolidWorks, lo que permitió graficar un modelo 3D del compartimiento para fusiles, ver Figuras N°6, N°7 y N°8.

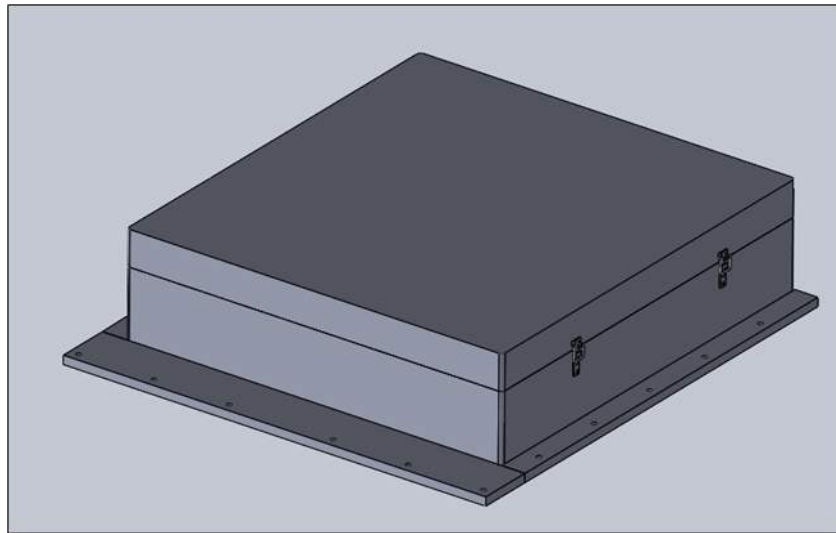


Figura N° 6: “Modelación 3D del compartimiento de fusiles”.

Fuente: Elaboración propia.

⁴ Extrusión: proceso de prensado, modelado y conformado para crear objetos por medio de un flujo continuo con presión, fuerza o tensión.

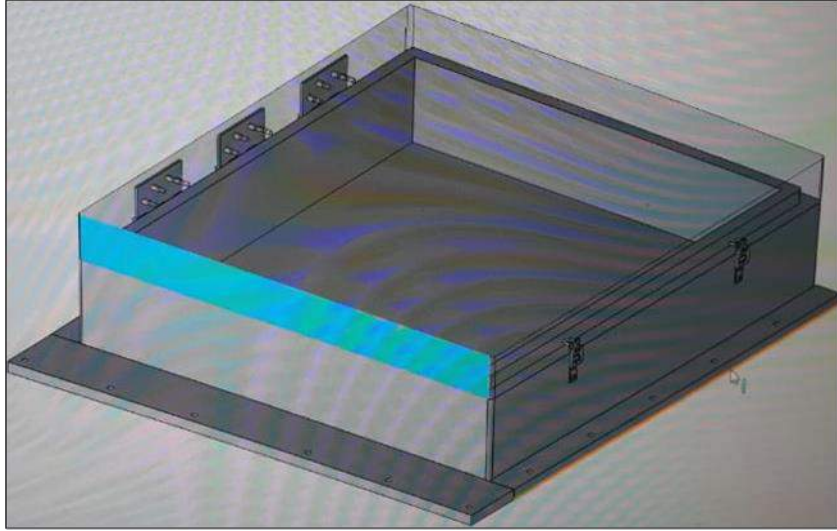


Figura N° 7: “Vista interior del compartimiento de fusiles”.
Fuente: Elaboración propia.

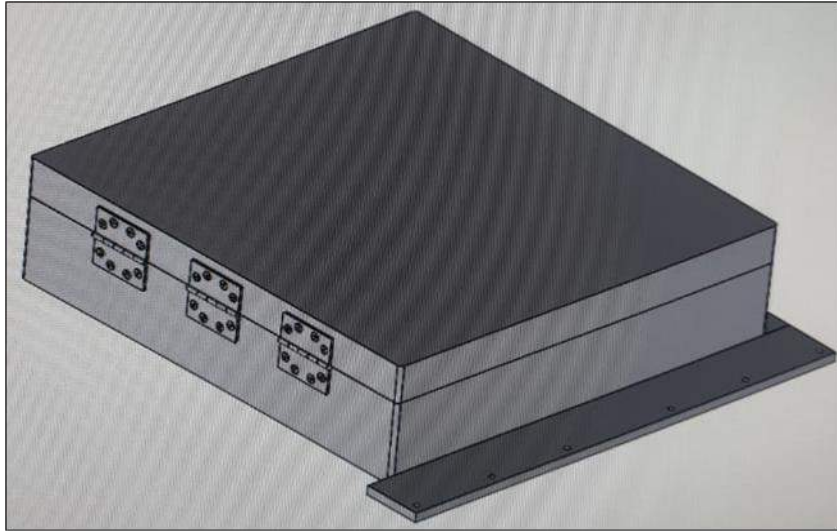


Figura N° 8: “Vista posterior del compartimiento”.
Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, se modeló en el software SolidWorks el compartimiento para cañones de recambio del armamento secundario del tanque, específicamente, la ametralladora de torre. Se modeló tanto el compartimiento sin aletas como el dissipador de calor, ver Figuras N°9 y N°10.

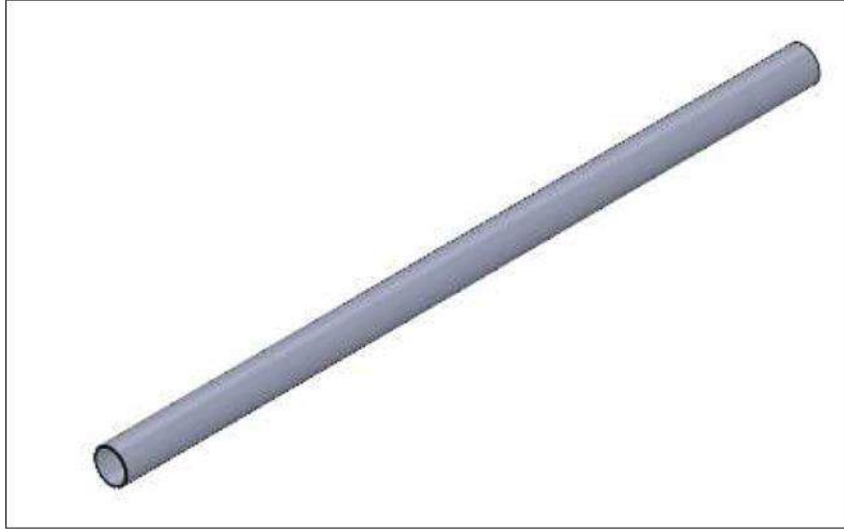


Figura N° 9: “Compartimiento sin aletas”.
Fuente: Elaboración propia.

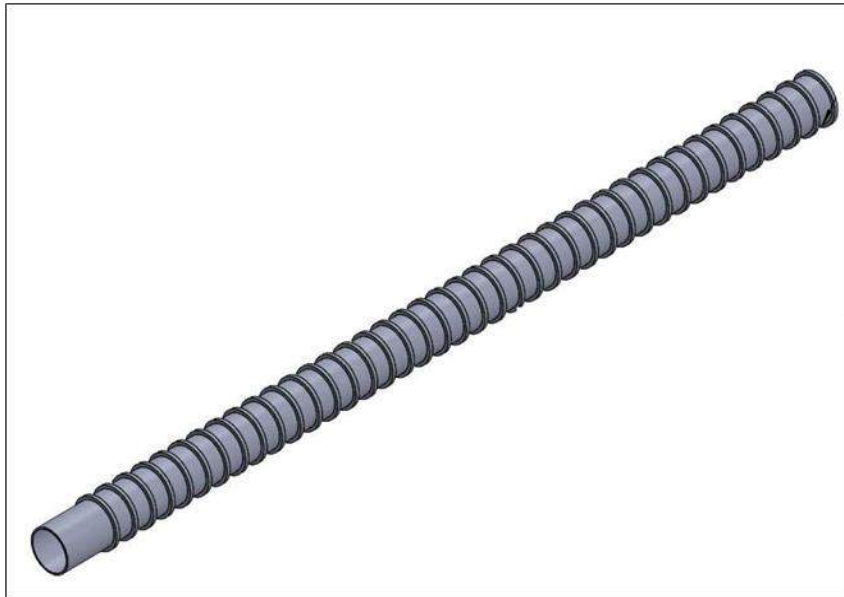


Figura N° 10: “Modelo de disipador de calor”.
Fuente: Elaboración propia.

4.1. Resultado de la investigación

Con la evaluación del sistema por parte del panel de expertos, realizada en la etapa validación del proyecto, se determina que el sistema da cumplimiento al 100% de los requerimientos técnicos del sistema, por lo que este es una solución a la necesidad planteada por el usuario y que dio inicio a esta investigación.

5. CONCLUSIONES

La ingeniería de sistema, guio el desarrollo de este trabajo investigativo, ya que es una metodología iterativa y secuencial que permite la desagregación de la necesidad del usuario en requerimientos de alto nivel o de Estado Mayor en el Ejército de Chile. Luego, estos requerimientos se desagregaron en requerimientos operacionales, permitiendo estos el obtener una mirada funcional del sistema. A través de las iteraciones y desagregaciones se obtuvieron, finalmente, los requerimientos técnicos del sistema, cuya importancia radicó en la determinación de los requisitos técnicos.

En la investigación, cobró gran relevancia la utilización del software de ingeniería, no sólo para diseñar y modelar en 3D la solución, sino que para la determinación de parámetros técnicos como lo son el material que se emplearía o los atributos que el sistema necesitaba para cumplir su objetivo.

La solución permitió optimizar el procedimiento de cambio de cañón realizado en la ametralladora de torre operada por el municionero de la tripulación. Esto se logró al reducir la distancia entre el tripulante y el compartimiento donde se traslada el cañón de la ametralladora, permitiendo que este no deba abandonar su posición inicial para introducirse al interior de la torre para tomar el cañón de recambio. Además, a través del principio de transferencia de calor, específicamente la conductividad térmica, permite acelerar la disminución de la temperatura en el cañón que ha sido utilizado.

La investigación dio como resultado una alternativa de solución a la necesidad real de las unidades blindadas de la I y VI División de Ejército, la que dice relación con la limitada capacidad de trasladar los fusiles de la tripulación y cañones del armamento secundario del tanque durante su operación, lo que ha provocado deterioro del armamento y con esto pérdida de recursos materiales, así como de dinero para la institución.

BIBLIOGRAFÍA

- ASKELAND, FULAY Y WRIGHT, W. (2011). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. México: CENGAGE LEARNING.
- BERNAL, L. (2009). *Quality Function Deployment (QFD) for Services Handbook*. Alemania: UNIVERSITÄT LEIPZIG.
- DIVDOC. (2015). MDO-60303 *Manual Tanque y Pelotón de Tanques*. Santiago: DIVDOC.
- DIVDOC. (2014). CDO-70301 *Cartilla de Operación del Tanque Leopard 2A4*. Santiago: DIVDOC.
- ERDEM, M. (2016). *Mechanical and Ballistics Properties of Powder Metal 7079 Aluminium Alloy*. China: RESEARCH GATE.
- INCOSE. (2015). *System Engineering Handbook A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. Ebook: WILEY.
- NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE (1987). *Ballistics Resistance of Personal Body Armor NIJ – 0101.04*. Estados Unidos: U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE.

SISTEMA DE VISUALIZACION VIRTUAL DEL ESPACIO DE BATALLA ARES (Augmented REality Sandtable) DEL EJÉRCITO DE LOS EE.UU. (US ARMY)

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2020

Fecha de aceptación: 29 de febrero de 2021

TCL. Alejandro Gómez Abutridy¹
TCL. Sergio Iturriaga Delgado²

Resumen: *El presente artículo describe en forma general la arquitectura y funcionamiento del Sistema de Visualización Virtual del Espacio de Batalla denominado “ARES” (Augmented REality Sandtable), el cual es utilizado ampliamente dentro de las unidades del Ejército de los EE.UU. para el entrenamiento de Cuarteles Generales y Puestos de Mando desde el nivel Compañía, Batallón, Fuerzas de Tarea y Brigada, integrando diferentes tecnologías tales como; Realidad Aumentada, Realidad Virtual, Simulación en Vivo, Virtual y Constructiva (LVC), entregando una visión general del Espacio de Batalla mediante subsistemas tales como; proyección en el suelo (Floor Projection), visión virtual 3D a través del Hololens y una integración de modelación de terreno y proyección 2D mediante un Cajón de Arena Digital (Sandtable). La unión de estas tecnologías tanto de hardware y software, permite generar un Panorama Operacional Común (POC) y mantener al día la Conciencia Situacional (Situational Awareness), aumentando la eficiencia y eficacia del proceso de toma de decisiones de los Comandantes (Military Decision Making Proccess, MDMP) y con ello permite tomar decisiones más rápidas y efectivas durante el desarrollo de las Operaciones en el Campo de Batalla Moderno.*

Palabras Claves: *Sistema de Visualización Virtual, Cajón de Arena, Realidad Aumentada.*

VIRTUAL DISPLAY SYSTEM OF THE BATTLE SPACE ARES (Augmented Reality Sandtable) OF THE US ARMY

Abstract: *This article describes in a general way the architecture and functionality of the Battle Space Virtual Visualization System called “ARES” (Augmented REality Sandtable), which is widely used within the units of the US Army for Simulation & Training of Headquarters and Command Posts from the Company, Battalion, Task Forces and Brigade levels, integrating different technologies such as; Augmented REality, Virtual REality, Live, Virtual and Constructive Simulations (LVC), providing an overview of the Battle Space through subsystems such as; Floor Projection, Virtual 3D vision using the Hololens hardware (Microsoft) and an integration of terrain modeling and 2D projection through a Digital Sandbox (Sandtable). The union of these technologies, hardware and software, allows generating a Common Operational Picture (POC) and keeping an updated Situational Awareness (SA), increasing the efficiency and effectiveness of the decision-making process of Commanders (Military Decision Making Proccess, MDMP) and allows making faster and more effective the decisions process during the development of Operations inside the Battlefield.*

Keywords: *Virtual Visualization System, Sandbox, Augmented Reality.*

¹ Ingeniero Politécnico Militar con Mención en Geoinformática de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Ciencias de la Ingeniería (M.Sc.IT) en “Tecnologías de la Información de Aplicación Militar” de la Academia Politécnica Militar y la Universidad de Cranfield del Reino Unido. Actualmente se desempeña como Ingeniero de Intercambio (ESEP) en el US ARMY Combat Capabilities Development Command-Simulation& Training Technology Center (CCDC-STTC) en los Estados Unidos de Norte América. Email: alejandro.gomez@ejercito.cl

² Oficial de Estado Mayor, Academia de Guerra del Ejército de Chile. Magister en “Planificación Estratégica”, Academia de Guerra del Ejército de Chile. Se desempeña actualmente como oficial de enlace del Ejército de Chile en el Centro de Maniobras de Excelencia, Fort Benning, GA, Estados Unidos. Email: sergio.iturriaga@ejercito.cl

1. INTRODUCCIÓN

La herramienta de visualización del espacio de batalla de “ARES” (Augmented Reality Sandtable) proporciona a los comandantes, planificadores de misiones, unidades de apoyo de combate y unidades de combate, una imagen operativa común definida por el usuario, al mismo tiempo utiliza enfoques de visualización flexibles y livianos para mejorar la toma de decisiones. La herramienta facilita eventos interactivos distribuidos en apoyo de capacitación colaborativa, planificación/ensayo de misiones, sesiones informativas, ejercicios de mando y control y revisiones después de la acción (AAR), (Figura 1).

El estudio y desarrollo del sistema ARES está bajo la responsabilidad general del Laboratorio de Investigación del Ejército de los EE.UU. (ARL por sus siglas en inglés), ubicado en Adelphi, Maryland, pero específicamente en el Simulation and Training Technology Center (STTC) dependiente del Combat Capability Development Command (CCDC) del Army Future Command (AFC).



Figura 1, “Battlefield Visualization System”
Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

La herramienta de visualización del campo de batalla de ARES, proporciona una representación interactiva 2D o 3D del área de interés, incluida la fusión de datos geoespaciales, modelos de terreno, posiciones de unidades, órdenes de movimiento y logística de apoyo del espacio de batalla. Al combinar todo esto y más, en una sola herramienta visual interactiva, el conocimiento del usuario del campo de batalla se mejora significativamente.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ARQUITECTURA DE ARES

La arquitectura ARES consiste en un sistema compuesto por 4 elementos principales; FloorProjection, SandTable, Mobile Android Device —TacticalPlanner y MixedReality (MR) Helmet Mounted Display (HMD), (Figura 2):

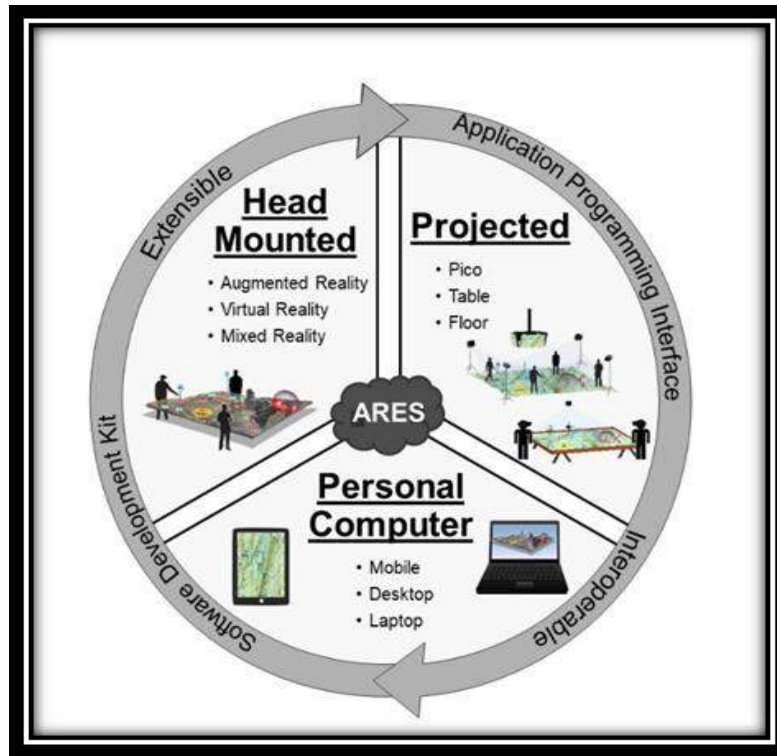


Figura 2, "Componentes de ARES"
Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

2.1. Floor Projection

Muestra los mapas, gráficos operativos e información del espacio de batalla en la superficie del piso para crear una proyección virtual en 2D (Figura 3). La proyección en el piso se puede usar junto con un HTC Wand¹ (Figura 4) y una pantalla plana para visualizar el modelo 3D del terreno que se muestra en el piso. La vista 3D también puede mostrar los elementos superiores de la superficie del terreno tanto terrestres como aéreos.

¹ HTC Wand, dispositivo de la empresa VIVE, que permite interactuar de forma inalámbrica y visualizar el mundo virtual. Cuenta con 24 sensores, trackpad multifunción, disparador de doble etapa, retroalimentación háptica HD y batería recargable.



Figura 3, "Floor Projection"

Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

El sistema de Floor Projection es ideal para Puestos de Mando desde el nivel Compañía, Batallón y Cuarteles Generales de niveles superiores, facilitando la planificación de misiones, ayudando a la capacitación y entrenamiento mediante un sistema de Revisión Después de la Acción (After Action Review, AAR).



Figura 4, "HTC Wand"

Fuente: <https://www.vive.com/us/accessory/controller/>

Los componentes principales del Floor Projection incluyen una pantalla plana (TV LED), dos proyectores (línea de base), superficie de piso proyectable, una computadora de servidor y una tableta Android para utilizar la aplicación de planificador táctico (Figura 5).



Figura 5, “Tableta Android, Planificador Táctico”

Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

2.2. SandTable

Está compuesto por un cajón con arena, el cual posee un proyector superior para proyectar el modelo de terreno sobre la arena, cuenta con un sensor Kinect que permite reconocer la superficie de la arena y permite modificar la imagen proyectada sobre la arena, interactuando en forma dinámica entre la imagen y la arena del cajón (Figura 6).



Figura 6, “Componentes de la SandTable”

Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

La SandTable es una mesa de arena tradicional digital que permite actualizaciones y cambios rápidos para visualizar el cambiante espacio de batalla. Ideal para Escuelas de las Armas y Academias de Guerra o Politécnica (Figura 7).



Figura 7, “Uso de la SandTable para instrucción y entrenamiento”

Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

Actualmente se usa para enseñar y discutir conceptos tales como navegación terrestre, construcción de modelos de terreno, órdenes de operaciones (OPORD) y misiones de planificación.

2.3. Mobile Android Device —Tactical Planner

La aplicación Tactical Planner utiliza plataformas móviles habilitadas para Android y es la interfaz principal utilizada en Ares (Figura 8).



Figura 8, "TacticalPlanner"

Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

El Tactical Planner es el principal dispositivo de entrada para Ares y es capaz de ser operado independientemente para colaboración independiente o remota. Este producto es ideal para unidades de nivel de Unidad Fundamental desplegadas hacia adelante y niveles superiores, equipos en terreno, planificación de misiones y entrenamiento.

2.4. Mixed Reality (MR) Helmet Mounted Display (HMD)

Ares utiliza Realidad Mixta (MR), integrando Realidad Virtual (VR) y Realidad Aumentada (AR) (Figura 9), para permitir la colaboración individual o en equipo, tanto local como remotamente usando el centro de comando virtual.



Figura 9, "Realidad Mixta"

Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

La AR también se puede usar para aumentar la experiencia de proyección de la mesa de arena física (Sandtable) y Proyección en el piso (Floor Projection), superponiendo imágenes del terreno en 2D con la información de las unidades desplegadas en el Campo de Batalla, lo que permite superponer capas digitales las cuales son mostradas sobre el terreno digital, entregando información separadas por diferentes tipos de clasificación ya sea; Logística, Inteligencia, Personal, Operaciones y Mando y Control.

Ideal para comandantes de nivel de pelotón y niveles superiores, equipos de combate, unidades de FFEE, planificadores de misiones, unidades de aviación, unidades blindadas y mecanizadas.

3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE VISUALIZACIÓN DEL ESPACIO DE BATALLA ARES

ARES se caracteriza por su interoperabilidad, que le permite emplear una determinada locación en vivo al recibir información acerca de una determinada zona respecto a terreno y servicios presentes. En este sentido, ARES puede recibir imágenes desde Google Maps, Openstreet Maps y cualquier otra fuente de información que contenga cartografía o imágenes del terreno digital, a fin de integrar antecedentes topográficos de la superficie y modelos digitales de elevación, entre otros.

El sistema ARES tiene capacidades independientes de gran valor, que le permiten crear y editar escenarios tácticos utilizando iconos y gráficos mediante la simbología OTAN.

ARES, puede funcionar modo "online" conectado a la arquitectura del sistema para la visualización y colaboración en tiempo real local o distribuida en distintas partes, a través de pantallas, computadoras personales, pantallas de piso, etc. Los escenarios creados, pueden ser guardados localmente en un determinado dispositivo electrónico o en el servidor ARES, para posteriormente, si es del caso, compartir la información desarrollada en la plataforma.

Por otra parte, el sistema puede funcionar en forma independiente, es decir en modo "offline", no teniendo dependencia del servidor o de una arquitectura mayor, pero tiene la capacidad de volver a unirse a la arquitectura ARES para aprovechar las capacidades adicionales de visualización y colaboración.

Además de las diversas modalidades, el software ARES proporciona información del terreno geoespacial e imágenes de mapas, raster de topografía y permite a los usuarios construir o editar planes de misión tácticos. Las modalidades del ARES tienen la capacidad

de funcionar juntas en un mismo ecosistema. Por otra parte, la plataforma permite utilizar las condiciones propias que entrega el empleo de un simulador.

Como plataforma física, ARES podría ser empleadas de las siguientes formas:

- Con sistemas de realidad aumentada.
- El trabajo mediante una realidad virtual.
- A través de una mezcla de las modalidades anteriores.

El software puede ser proyectado como sigue:

- Un cajón de arena tradicional (Sandtable), complementado con componentes comerciales que permiten al usuario ver e interactuar con representaciones visuales de un área de operaciones y datos relacionados.
- Una aplicación de software móvil que proporciona una visión general del área de operaciones, con datos del terreno geoespacial y capas adicionales de datos para la interacción y el análisis (Floor Projection).
- Una aplicación que muestra el terreno y otros datos en el área de operaciones, a través de Visores de Realidad Mixta (por ejemplo, Microsoft HoloLens o HTC Wand) (Figura 10).



Figura 10 “Uso de Hololens”

Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

Lo anterior, le otorgan un gran valor de uso para el entrenamiento de comandantes, desarrollo de procesos, el mando y control, entre otros, principalmente en las siguientes áreas de desarrollo profesional de comandantes:

- Desarrollo de la comprensión situacional (Situational Awareness).
- Desarrollo de tácticas y técnicas contra armas de destrucción masiva.
- Desarrollo de Operaciones Militares Distintas de la Guerra (MOOTW).
- Mejorar el entrenamiento en el proceso de toma de decisiones militares (MDMP).
- Mejorar el entrenamiento en el proceso de la Preparación de Inteligencia del Campo de Batalla, (Intelligence Preparation of the Battlefield, IPB).
- Mejorar el rendimiento de combatientes, comandantes y de la unidad en general.
- Garantizar la interoperabilidad y el empleo conjunto.
- Desarrollar ejercicios conjuntos.
- Entrenar el empleo de los fuegos.
- Mejorar el mando tipo misión.

Se ha podido concluir, que el uso de ARES ha mejorado el proceso de enseñanza-aprendizaje en los siguientes aspectos:

- Aumento de la participación y retención de los estudiantes.
- Disminución de los tiempos para crear terrenos y escenarios en 3D.
- Mejora en la planificación y desarrollo de trabajos aplicados y juegos de guerra.

En la actualidad el Ejército de los EE.UU. se encuentra implementando un ambicioso proyecto tendiente a dotar a sus unidades con el Sistema de Visualización del Espacio de Batalla ARES, en las siguientes unidades: Fort Polk, Operations Group JRTC, 101 st Airborne Division, Fort Benning, Fort Rucker, West Point Academy y en el Department of Homeland Security (DHS) (Figura 11).

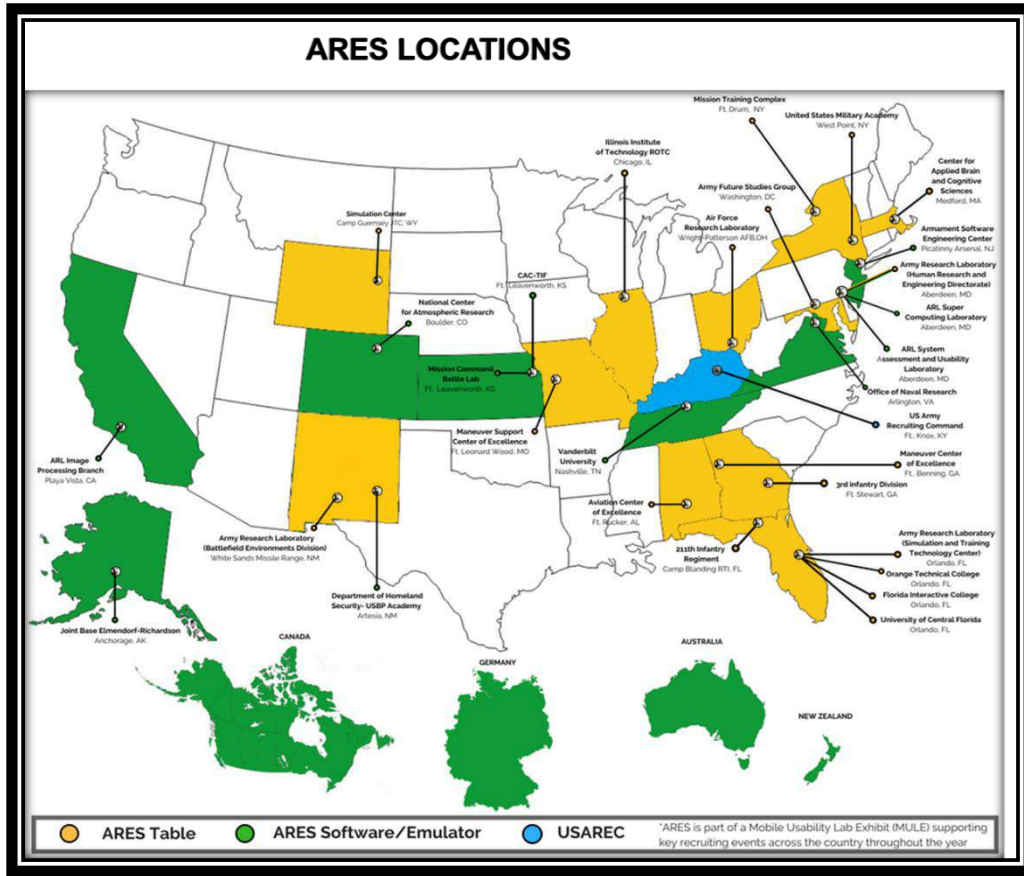


Figura 11 “Utilización actual de Ares”

Fuente: <https://simulation.arl.army.mil/ares/>

El centro de Maniobras de Excelencia (MCoE) ubicado en Fort Benning, que reúne las Escuelas de Infantería y Blindados-Caballería cuenta con un gabinete de ejercicios de última generación para el empleo de la plataforma ARES, con el propósito de contribuir al desarrollo profesional de comandantes de todos los niveles, considerando que el MCoE planifica anualmente 24 cursos con una población flotante de más de 16.000 estudiantes de 90 países.

Por otra parte, el proyecto ARES es además utilizado por los Ejércitos de Alemania, Australia, Canadá y Nueva Zelanda.

4. CONCLUSIONES

La plataforma ARES tiene la virtud de reunir tecnologías para la interacción del usuario, incluida la realidad virtual y aumentada, una interfaz tangible y otras modalidades distribuidas, con una arquitectura simple, lo que permite que su empleo sea de fácil acceso y uso para sus potenciales usuarios.

El uso de la plataforma ARES en el Ejército de Chile podría ser factible, en atención a que emplea tecnología presente en el mercado tradicional, de bajo costo, lo que hace factible obtener apoyo respecto a su posible implementación y soporte técnico.

ARES tiene el potencial de entregar a los comandantes una visualización general del espacio de batalla, mediante sistemas de realidad virtual y aumentada, permitiendo la colaboración entre los mandos y el entrenamiento de los cuarteles generales y puestos de mando, mejorando el liderazgo, la interoperabilidad, ahorrando tiempo al crear terrenos y escenarios para ser empleados en juegos de guerra y ejercicios aplicados, los cuales permitirían colaborar en la preparación efectiva de la Fuerza Terrestre.

Se estima que la plataforma sería un real apoyo para los cursos de la Academia de Guerra y Politécnica, las Escuelas Matrices y Escuelas de las Armas, ya que podría potenciar el desarrollo de aspectos tales como: la comprensión situacional, el trabajo en un ambiente conjunto, interagencial e incluso multinacional y las Operaciones Militares Distintas a la Guerra (MOOTW), entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

Evaluation of Augmented REality Sandtable (ARES) during Sand Table Construction, ARL-TR-8278, JAN2018.

The Augmented REalitySandtable (ARES), ARL-SR-0340, OCT2015.

Effect of Topography on Learning Military Tactics – Integration of Generalized Intelligent Framework for Tutoring (GIFT) and Augmented REalitySandtable (ARES), ARL-TR-7792, SEP2016.

Ares Project Summary, NOV2018, CCDC-SC-STTC, US ARMY.

PROCEDIMIENTO EDITORIAL

En el sitio web del Boletín (www.boletincientifico.cl), ACAPOMIL (www.acapomil.cl) e Intranet (www.acapomil.mil), se indicará el periodo y correo de recepción de los trabajos.

Para redactarlos, el autor se debe regir por las normas descargables de los sitios web de Internet e Intranet antes mencionados, o bien, pueden solicitarlas a extension@acapomil.cl.

Las colaboraciones se deben remitir vía email al correo extension@acapomil.cl, junto con la Carta de Cesión de Derechos Patrimoniales (descargable de los sitios web de Internet e Intranet antes mencionados, o bien, pueden solicitarlas a extension@acapomil.cl).

El Consejo Editorial -constituido por el Presidente (Director de la ACAPOMIL) y los Consejeros (personal de la ACAPOMIL, civil o militar, designado por el Director de la ACAPOMIL)- acusará recibo al autor de la recepción de su colaboración y tendrá un máximo de 20 días hábiles para informar de la admisibilidad de la colaboración.

De resultar admisible el artículo, el Consejo Editorial dará inicio a la evaluación ciega por dos pares arbitrales que tendrá como máximo una duración de dos meses.

La evaluación arbitral considera: la coherencia de la estructura con el título del trabajo, la pertinencia con el tipo textual adscrito, la pertinencia y actualidad de las fuentes bibliográficas consultadas, la coherencia entre contenido y resumen de la colaboración, la capacidad de hacer inferencias, relaciones y enlaces sobre la información y para establecer conclusiones, el adecuado uso de la redacción y ortografía en el idioma respectivo, la originalidad del trabajo y si es significativo para el desarrollo del medio.

Una vez terminado este proceso, se inicia la revisión por parte de evaluadores externos a la ACAPOMIL.

Cumplido esto último, se informará al autor de su aceptación inmediata, aceptación previa mejoras mayores o rechazo (sin apelación) del trabajo, a través de un correo electrónico por parte del Jefe o Asesor de la Sección Extensión.

En el caso de aceptación previa mejoras mayores, el autor deberá efectuar los cambios exigidos por los árbitros, en un plazo no mayor a siete días hábiles. Posteriormente, se someterá a una nueva revisión arbitral.

El autor de la colaboración publicada recibirá como agradecimiento una copia impresa de la revista. El Consejo Editorial puede modificar el presente procedimiento sin previo aviso.