



EJÉRCITO DE CHILE
ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR



Boletín Científico Tecnológico

58°C

Nº 23



2018 - 2019

ISSN 0718-1191



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:

Coronel Osvaldo Larrain Gallegos

El Boletín Científico Tecnológico está registrado bajo el ISSN 0718-1191.

Dirección web: www.boletincientifico.cl

Dirección postal: Avda. Valenzuela Llanos 623, La Reina, Santiago, Chile. Teléfono (562) 226683654.

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.

Diseño e impresión: Ediciones e Impresiones IGM.

Corrección de texto e imágenes: Academia Politécnica Militar.

Portada: IGM.

Impreso en Santiago de Chile, julio de 2019.



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

Nº 23, 2018-2019. ISSN 0718-1191

Director

Coronel Osvaldo Larrain Gallegos

Oficial de Ejército del arma de Artillería. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Mecánica de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Dirección de Empresas (MBA) de la Universidad Diego Portales. Máster en Administración y Dirección de Empresas de la Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, España. Actualmente se desempeña como Director de la Academia Politécnica Militar.

Secretario

Teniente coronel Claudio Gutiérrez Romero

Oficial de Ejército del arma de Infantería. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención mecánica de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Administración de Empresas, con especialidad en Gestión Integrada de la Calidad, Seguridad y Medioambiente de la Universidad de Viña del Mar.

CONSEJO EDITORIAL

José Manuel Llanos Acevedo

Coronel

Ingeniero Politécnico Militar, mención Comunicaciones.
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.

Lautaro Rivas Reveco

Teniente coronel

Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas, mención Geoinformática. Magíster en Geodesia y Geodinámica, de la Ohio State University, EE.UU.

Leonardo Alborno Salinas

Teniente coronel

Ingeniero Politécnico Militar, mención Química.
Magíster en Ingeniería de Sistemas Logísticos, Academia Politécnica Militar.



Pedro Zamanillo Gálvez

Teniente coronel

Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas TICs, mención en Informática y Computación.

Francisco Villalobos Sepúlveda

Teniente coronel

Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Mecánica.

Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Sistemas de Armas
y Vehículos Militares, Academia Politécnica Militar.

Magíster en Ingeniería de Sistemas Logísticos, Academia Politécnica Militar.

Óscar Rodríguez Undurraga

Mayor

Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Vehículos Militares.

Javier Vega Sepúlveda

Mayor

Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Electrónica.

Magíster en Planificación y Gestión del Riesgo de Desastres, mención Ingeniería
Logística y Tecnologías Asociadas, Academia de Guerra.

Carlos Suazo Álvarez

Personal a Contrata

Geógrafo, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Magíster en Gestión Eduacional, Universidad Andrés
Bello. Metodólogo en Investigación en Ciencias Sociales, Universidad Europea Miguel de Cervantes.

Yorma Sepúlveda Paredes

Profesor Civil

Químico, Universidad de Santiago de Chile.

Magíster en Ciencias de los Materiales, Universidad de Santiago de Chile.

Cinthy Lepin Rueda

Profesor Civil

Licenciada en Letras, mención Lingüística y Literatura Hispánicas, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Magíster en Letras, mención Lingüística y Literatura Hispánicas, Pontificia Universidad Católica de Chile.

SUMARIO

<i>Editorial</i>	9
Diseño preliminar de un cajón de los mecanismos monobloque de aleación ferrosa para el fusil SG 542-1 FAMA <i>MAY. Óscar Pastor Escalona, Dr. Aquiles Sepúlveda Osses</i>	13
Construcción de un prototipo de simulador para la instrucción y entrenamiento del pelotón y sección de tanques Leopard 2A4 <i>MAY. Alberto Villarroel Rivera</i>	37
Erosión costera y cambio climático en la Región del Biobío, Chile <i>Sr. Juan Carlos Pastene, Sr. Alexander Siegmund</i>	57
Blockchain y su Aplicación en ciberdefensa <i>SG2. Roberto Soto Yanca</i>	75
Diseño conceptual de la modificación de la posición del selector de aumento óptico de la cámara térmica del tanque Leopard 2A4. <i>MAY. Juan Andrés Beyer Peña</i>	97
Diseño preliminar de un dispositivo deflagrador-despoletador de UXOs a base de una reacción de alta temperatura para operaciones EOD <i>MAY. Pablo Ovalle Vásquez</i>	127
Evaluación de un nuevo propelente derivado del perclorato de amonio, modificado con derivados de ferroceno, y su potencial aplicación en cohetería en el Ejército <i>MAY. Ángel Norambuena Pinto</i>	161
Procedimiento editorial	189

EDITORIAL



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR



EDITORIAL

Por vigésimo tercer año consecutivo, la Academia Politécnica Militar (ACAPOMIL) tiene el agrado de presentar un nuevo número del Boletín Científico-Tecnológico, fruto del trabajo mancomunado entre los integrantes, tanto civiles como militares, de diversas unidades del Ejército de Chile.

En esta ocasión, además de cumplir con una de las tareas fundamentales de este Instituto de formación superior, relativa a la transferencia de conocimientos e integración con la sociedad, se da cuenta cabalmente de una aproximación real a la visión de ser un modelo de educación, investigación e innovación en disciplinas científico-tecnológicas, con la finalidad de contribuir al desarrollo de la industria militar, en particular, y del sector defensa, en general.

A este respecto, la presente edición contiene siete artículos provenientes de investigaciones que proponen soluciones innovadoras a problemas reales del Ejército y la defensa nacional. Los diseños implementados por estos Ingenieros Politécnicos Militares 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.

Junto con lo anterior, 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, como los innegables efectos del cambio climático y el abismante y aún desconocido mundo digital y su aplicación en la ciberdefensa.

Sinceramente, esperamos que el lector sepa apreciar y valorar los aportes aquí presentados, los que se unen a los ya 93 años que lleva la Academia Politécnica Militar al servicio de la ciencia y tecnología.

OSVALDO LARRAÍN GALLEGOS
Coronel
Director de la Academia Politécnica Militar

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**DISEÑO PRELIMINAR DE UN CAJÓN DE LOS
MECANISMOS MONOBLOQUE DE ALEACIÓN
FERROSA PARA EL FUSIL SG 542-1 FAMAE**

MAY. ÓSCAR PASTOR ESCALONA
DR. AQUILES SEPÚLVEDA OSSES



DISEÑO PRELIMINAR DE UN CAJÓN DE LOS MECANISMOS MONOBLOQUE DE ALEACIÓN FERROSA PARA EL FUSIL SG 542-1 FAMAE

MAY. Óscar Pastor Escalona¹

Dr. Aquiles Sepúlveda Osses²

Resumen: desde hace unos 30 años, FAMAE produce el fusil SG 542-1 calibre 7,62x51 mm, para cuyo cajón de mecanismos se emplean láminas plegadas, estampadas, soldadas y mecanizadas. Por otra parte, recientemente, bajo licencia IWI, FAMAE ha fabricado el respectivo cajón del fusil Galil ACE 22 NC, calibre 5,56x45 mm, sobre la base de un monobloque de acero 4340 trabajado en centros de mecanizado CNC. Así, el objetivo de este trabajo es describir el diseño preliminar de un cajón de mecanismos monobloque en acero 4340, para el fusil SG 542-1 calibre 7,62x51 mm FAMAE. Ello en la perspectiva de disminuir tiempos y costos de manufactura.

Palabras clave: fusil, cajón de mecanismos, diseño asistido por computador, diseño de ingeniería, manufactura, monobloque.

Abstract: for about 30 years, FAMAE has produced the SG 542-1 7,62x51 mm caliber FAMAE rifle, with a receiver made of stamped, folded, welded and machined steel plates. Moreover, recently and under IWI license, FAMAE has fabricated the receiver of the Galil ACE 22 NC 5,56x45 mm caliber rifle, from a 4340 steel mono-block worked in CNC machining centers. Thus, the present work objective is to describe the preliminary design of a mono-block receiver, made of 4340 steel, for the SG 542-1 7,62x51 mm caliber rifle. Reductions of fabrication time and costs are expected.

Keywords: rifle, receiver, computer aided design, computer aided engineering, manufacturing, mono-block.

-
- 1 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Armamento. Jefe del Departamento de Ingeniería e I2D del Instituto de Investigación y Control del Ejército.
 - 2 Doctor-Ingeniero, Universidad de París VI; Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile; Profesor de la Universidad de Chile y de la Academia Politécnica Militar; Asesor de Ingeniería del Instituto de Investigación y Control del Ejército.



1. INTRODUCCIÓN

Los procesos y configuraciones establecidos para la manufactura de las armas de fuego han evolucionado constantemente desde los albores del siglo XV. Lo anterior se manifiesta en forma progresiva y acorde a la innovación tecnológica existente en cada época. Es esta una búsqueda constante de conocimiento específico que permite acortar las brechas existentes con relación al armamento de uso en los distintos ejércitos modernos. Es así como desde los inicios de nuestra historia patria y, por la necesidad de contar con un organismo capaz de dar satisfacción a los requerimientos de aquel entonces, se fundaron las Fábricas y Maestranzas del Ejército (FAMAE), heredera de la primera empresa de defensa de América Latina. Esta plataforma industrial, la que forma parte de la administración del Estado, ha contribuido permanentemente al desarrollo de la industria nacional y a la modernización de las Fuerzas Armadas, particularmente al Ejército de Chile. En el presente, su área de operaciones se encuentra principalmente orientada a satisfacer las necesidades que permitan contar con una mayor autonomía y abastecimiento en el mantenimiento y actualización de procesos, con especial orientación al armamento menor, municiones, optrónica, pirotecnia, productos químicos, desmilitarización, etc.

Entre las muchas competencias que posee FAMAE en el ámbito del armamento menor, corresponde señalar la fabricación del fusil de asalto liviano modelo SG 542-1 calibre 7,62 mm FAMAE, fabricado bajo licencia de la empresa SIG SAUER desde 1988. Esta arma a la fecha presta servicios al Ejército de Chile. En particular, el cajón de los mecanismos del referido fusil se fabrica a partir de planchas de acero, que son estampadas, plegadas y soldadas, procesos que requieren intensivamente de mano de obra especializada y personal de control de calidad en línea. Por otra parte, recientemente FAMAE ha estado fabricando el cajón de mecanismos del fusil Galil ACE 22 NC, calibre 5,56x45 mm, bajo licencia IWI, sobre la base de un monobloque de acero 4340 trabajado en centros de mecanizado de control numérico hoy disponibles en esa empresa nacional. Entre los dos métodos de fabricación expuestos en relación con cajones de mecanismos, existe una clara brecha tecnológica en favor de la manufactura a partir de un monobloque mecanizado en centros de mecanizado.

En el contexto expuesto, el objetivo de este trabajo es describir el diseño preliminar de un cajón de los mecanismos monobloque de acero 4340 para fusil el SG 542-1 FAMAE. Esto en la perspectiva de disminuir costos y tiempos de fabricación, haciendo uso de modernas técnicas de diseño mecánico y de los equipos de control numérico disponibles en FAMAE.



2. DIAGNÓSTICO DEL ARMAMENTO

2.1 Descripción general del fusil SG 542-1 FAMAE

El fusil de asalto FAMAE, modelo SG 542-1, es un arma automática de trayectoria tensa, con sistema de retroceso por toma de gas y con cierre giratorio. Es alimentada por cargadores tipo cajetilla con capacidad para 20 tiros, la munición puede ser de guerra, fogeo o de proyección para granada de fusil. El arma puede emplearse en cualquier posición, para tiro individual, semiautomático y para disparar ráfagas. El firme apoyo del bípode aumenta considerablemente la precisión del tiro. El tromblón cubrellamas que está fijado en la boca del cañón sirve para disparo de granadas y para armar la bayoneta.

El fusil de asalto liviano SG 542-1 FAMAE es un arma automática de carga por sistema de gas con cierre giratorio, es decir, la presión interior desarrollada por los gases, producto de la deflagración de la pólvora del cartucho, actúa sobre la cabeza del cierre ocasionando un movimiento violento de este hacia atrás, girando su cabeza y expulsando la vainilla. Terminada la secuencia anterior y liberando el cierre de la presión de los gases, vuelve a la posición inicial introduciendo un nuevo cartucho en la recámara.

2.2 Descripción general del fusil GALIL ACE 22 NC

A lo largo de los años, el Fusil GALIL ACE 22 NC ha sido probado en combate y es una de las armas más fiables en condiciones adversas y extremas. Es un arma individual, liviana, de trayectoria tensa, enfriada por aire, accionada por gases, en cabezal de pistón, bloqueo de cerrojo giratorio, alimentada por cargador NATO tipo cajetilla curvo, con capacidad para 35 y 50 cartuchos (5.56x45 mm).

El arma puede emplearse en cualquier posición con selector de tiro por ambos lados, con tres posiciones (seguro, tiro-tiro, ráfaga). Fácil de operar, la palanca selectora de tiro y el retén del cargador se pueden accionar desde cualquier lado del arma, de modo que es fácil de utilizar tanto por soldados diestros como zurdos. El arma está dotada con culata retráctil de 4 posiciones, además cuenta con cinco rieles Picatinny, que permiten instalar una amplia variedad de accesorios, tales como linterna, mira, bípode de mira telescópica, etc.

3. PRUEBAS, ENSAYOS Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 Solicitud de pruebas, ensayos y caracterización experimental

Las pruebas, ensayos y caracterización experimental, en una primera etapa, estuvieron a cargo del Laboratorio de Ensayos Mecánicos del Departamento de Sistemas de Armas



del Instituto de Investigaciones y Control del Ejército de Chile (IDIC). Para lo anterior, se entregó una muestra correspondiente a un cajón de mecanismos del fusil SG 542-1.

La muestra fue sometida a las siguientes actividades (Figura N° 1: Control dimensional; Ensayo de dureza; Ensayo de tracción; Análisis químico; Análisis metalográfico).



Figura N° 1: "Probetas para ensayos mecánicos SG 542-1".

Fuente: archivo del autor.

Para realizar los diferentes ensayos se utilizaron las siguientes Normas ASTM:

- Norma ASTM A370-15 "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products".
- Norma ASTM E18-15 "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials".
- Norma ASTM E3-11 "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens".

3.1.1 Ensayo de tracción cajón de mecanismos SG 542-1

Este ensayo fue realizado con el objeto de determinar las propiedades mecánicas del acero del cajón de mecanismos del fusil SG 542-1.

3.1.2 Prueba masa reculante

Esta prueba considera la medición de la fuerza que ejerce la masa reculante sobre la placa posterior del cajón de mecanismos, dato necesario para la posterior simulación del cajón de mecanismos monobloque que se quiere diseñar.

3.1.2.1 Medición de fuerza masa reculante fusil SG 542-1 en IDIC

La prueba se realizó en el Departamento de Sistemas de Armas del Instituto de Investigación y Control, con el objeto de determinar la fuerza que ejerce la masa reculante



sobre la placa posterior del fusil SG 542-1 FAMAe. Para la toma de datos, se empleó una máquina de ensayos uniaxial marca Instron 4465, número de serie 4465P1793, con fecha de calibración 20 de enero de 2017, para cargas de tracción de 5 a 50 kgf. La prueba se realizó a una temperatura ambiente de 21 °C y una humedad relativa de 65%. Para lo anterior, se emplearon treinta fusiles de asalto liviano SG 542-1.



Figura N° 2: "Medición fuerza masas reculante fusil SG 542-1, en IDIC".

Fuente: archivo del autor.

En la Figura N° 2 se observan las pruebas realizadas para obtener las mediciones estadísticas. Entre estas, es importante destacar la media aritmética obtenida correspondiente a 11,635 Kgf. (114,14 N). El valor obtenido sirve como dato de entrada inicial para posteriores mediciones en el diseño del cajón de mecanismos monobloque.

3.2 Pruebas dinámicas en fusil SG 542-1 FAMAe

Para esta segunda etapa de medición, se realizaron pruebas dinámicas al fusil SG 542-1 en colaboración con el Departamento I2D y Planta de Armamento Menor de FAMAe. Los objetivos de esta medición fueron determinar la aceleración que se produce en el cajón de mecanismos, producto del retroceso de su masa reculante, y la fuerza puntual que ejerce el cierre en el momento que impacta sobre la placa posterior del cajón de mecanismos del fusil. Por lo específico y ocasional de esta prueba, a continuación se detalla su procedimiento.

3.2.1 Celda de carga (Figura N° 3)

Las celdas de carga piezoeléctricas de cuarzo, serie 9712B, ofrecen una amplia medición de las fuerzas de compresión y tracción, que se generan en el interior del



cajón de mecanismos del fusil SG 542-1 FAMA. Estos sensores de fuerza ofrecen alta sensibilidad, rigidez, respuesta rápida y son capaces de soportar sobrecargas de compresión del 20 al 400%.



Figura N° 3: "Posición celda de carga en placa posterior".

Fuente: archivo del autor.

3.2.2 Sensor de aceleración (Figura N° 4)

Para las pruebas, se utilizó el sensor de aceleración de cuarzo serie 8742A, de baja sensibilidad, alta frecuencia de resonancia y amplio ancho de banda. Estos sensores son ideales para las mediciones de impacto de metal a metal. Permiten medir los impulsos de corta duración y golpes por choque, que se generen en el interior del cajón de mecanismos del fusil SG 542-1.



Figura N° 4: "Posición de sensor de aceleración en palanca de preparar".

Fuente: archivo del autor.



3.2.3 Medición en polígono subterráneo (Figura N° 5)

La prueba se realizó en dependencias de FAMAE, en el polígono subterráneo, junto a personal de I2D y personal de seguridad, para operar la ejecución del tiro, conforme a lo siguiente:

Se realizaron cinco tiros por prueba (aceleración, fuerza sobre placa posterior), lo que entregó datos para graficación correspondientes a cinco mil puntos. Los datos obtenidos se cargaron en el *software* Labview para la obtención de máximos adecuados que sirvan para determinar los esfuerzos comprometidos.



Figura N° 5: "Ejecución pruebas dinámicas para obtención de datos".

Fuente: archivo del autor.

3.2.4 Revisión de los resultados obtenidos en pruebas dinámicas

Conforme a medición obtenida en IDIC, en un universo de treinta fusiles SG 542-1 FAMAE, se obtuvo una media de 11.6 Kgf. Lo que es equivalente a 114,1 N. Dicha medición entrega un dato inicial del movimiento de la masa reculante producto de una fuerza de compresión ejercida por la máquina Instron calibrada en 50 kgf.

Por otra parte, se hicieron mediciones en dependencias de FAMAE, mediante celdas de carga y sensores de aceleración, elementos que se ubicaron conforme a orientaciones y planimetría dispuesta por I2D en el sector de la placa posterior del cajón de mecanismos del fusil SG 542-1. Dichas pruebas marcaron un precedente no menor, ya que es primera vez que se realizaron a este fusil, entregando datos más exactos y reales que los que hasta la fecha se consideraban para los diferentes estudios realizados a los fusiles de asalto liviano de uso en la Institución. El valor obtenido corresponde a 29 Kgf, equivalente a 286 N. y una aceleración promedio de 1619,4 m/s². De acuerdo con



lo anterior, para realizar los posteriores estudios estáticos y de diseño, correspondientes al cajón de mecanismos monobloque, será empleada 286 N, dato obtenido por la medición de las pruebas dinámicas al fusil.

4 SIMULACIÓN Y DISEÑO FUNCIONAL

4.1 Análisis de diseño planimétrico del fusil SG 542-1

Para el análisis de diseño planimétrico del fusil SG 542-1 (Figura N° 6), se contó con los planos CAD del fusil, los que fueron proporcionados por el departamento I2D de FAMA E. Dichos planos se encontraban en formato del programa de diseño Autodesk Inventor, con extensión .ipt, lo que hizo necesario transformarlos a formato Solidworks, con extensión .sldsm. Hecha la transformación, se definieron los parámetros claves, los que consideran las dimensiones (cotas) y las relaciones geométricas esenciales para definir el modelo tridimensional.

El análisis planimétrico permitió establecer los datos iniciales para la construcción del cajón de mecanismos monobloque que se necesitaban crear.

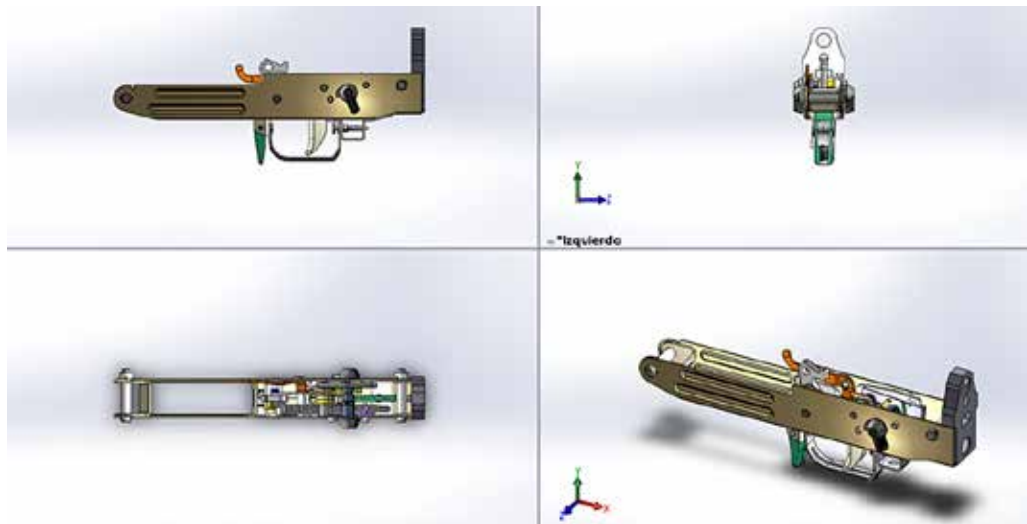


Figura N° 6: "Imagen CAD SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

4.2 Diseño gráfico CAD del cajón de mecanismos monobloque

Para el diseño gráfico CAD (Diseño asistido por computador) del cajón de mecanismos monobloque, se utilizó el programa de diseño mecánico en 3D Solidworks, el



que emplea un entorno gráfico basado en Microsoft® Windows®, *software* intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar las ideas de forma rápida, sin necesidad de operaciones complejas. En la Figura N° 7 se aprecia la vista de sección del modelo, logrando identificar específicamente el espesor de sus paredes laterales de 1.5 mm, dato necesario para el posterior mallado del modelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos a través del diseño, la pieza presenta una masa de 0.422605 kg, equivalente a un peso de 4.14048 N, y a un volumen de $5.38351 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Los valores obtenidos serán utilizados para el posterior estudio estático, definiendo específicamente su mallado para efectos de los cálculos por elementos finitos.

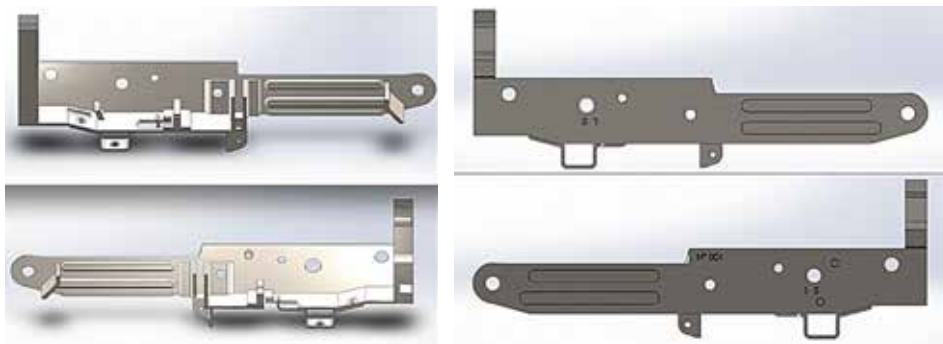


Figura N° 7: "Vistas de sección y laterales cajón de mecanismos monobloque".

Fuente: elaboración propia.

4.3 Simulación CAE de los mecanismos y componentes integrados del fusil

Solidworks Simulation es una herramienta CAE (Ingeniería Asistida por Computador) de validación de diseño integrada en Solidworks que permite simular el comportamiento de piezas y ensamblajes mediante la aplicación del análisis de elementos finitos (FEA). Su uso permite estudiar el comportamiento mecánico y térmico de un modelo de pieza o ensamblaje bajo ciertas condiciones de servicio, sin necesidad de crear un prototipo físico real del mismo. Al contarse con una perfecta integración en Solidworks, se puede modificar la geometría del modelo 3D y volver a ensayarlo bajo diferentes condiciones de contorno (distintos materiales, cargas, mallado, etc.) tantas veces como sea necesario hasta encontrar el modelo que mejor se ajuste a las necesidades requeridas.

4.3.1 Análisis estático

El análisis estático del cajón de mecanismos monobloque creado, se realizó mediante la aplicación de un sistema de ecuaciones lineales de equilibrio en cada uno de los elementos finitos establecidos por el mallado del sólido.



El cálculo inicial del análisis estático determina los desplazamientos de cada uno de los nodos de la malla. A continuación, se calcula la deformación unitaria y las tensiones para cada uno de los puntos.

4.3.1.1 Propiedades del material para simulación estática

Es importante mallar el modelo, definir las propiedades mecánicas del material, las restricciones de movimiento y las cargas a las que se someterá. Para el modelo, se considerará inicialmente un mallado estándar de sólido, un espesor de paredes laterales declarado de 1,5 mm en el diseño gráfico CAD del cajón de mecanismos monobloque y las propiedades del material del cajón. Dichos valores se presentan en Tabla N° 1.

PROPIEDADES DEL MODELO Y DEL MATERIAL	
Nombre	AISI/SAE 4340 Acero Normalizado
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Criterio de fluencia (error)	Tensión de Von Mises
Límite elástico	710 N/mm ² (MPa)
Esfuerzo de tracción	95 kgf/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.32
Densidad	7850 kg/m ³
Módulo cortante	8e+010 N/m ²
Coefficiente de dilatación térmica	1.2e-005 kelvin
Coefficiente de roce	0,05
Masa	0.422605 kg
Volumen	5.38351e-005 m ³
Peso	4.14048 N
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Modelo adaptativo	Tipo H
Nivel de precisión	99%
Máximo número de bucles	3

Tabla N° 1: "Propiedades AISI/SAE 4340 para simulación estática".

Fuente: elaboración propia.

4.3.1.2 Mallado, para simulación estática

El mallado tridimensional de la pieza (Figura N° 8) es una de las etapas más importantes en la realización de la simulación numérica en un computador mediante el método numérico de elementos finitos. El mallado es una operación que divide la pieza en porciones más pequeñas denominadas elementos que, a su vez, se encuentran conectados a otros elementos adyacentes mediante puntos o nodos. Este método resuelve ecuacio-



nes diferenciales en cada uno de los nodos del modelo mallado y extiende la solución, de forma aproximada y mediante interpolación, al resto de puntos que no son nodos. El proceso final permite visualizar el resultado del análisis sobre el mismo modelo 3D y en colores, por el suavizado y la interpolación de los resultados numéricos obtenidos.



Figura N° 8: "Mallado sólido para análisis estático monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

Según los datos resultantes del diseño gráfico CAD del cajón de mecanismos monobloque, en relación con el espesor de sus paredes laterales, 1,5 mm, correspondió establecer un tipo de malla sólida fina de alta calidad, con un tamaño de 0,75 mm y una tolerancia dependiente del tamaño de los elementos y la geometría del modelo de 0,0375 mm, conforme a Tabla N° 2, permitiendo mejores resultados, ya que los elementos se adaptan mejor a la superficie. Para el mallado se definió un método adaptativo del tipo H, el que es un método avanzado, que permite subdividir en elementos más pequeños las zonas donde existe mayor riesgo de error (zonas donde existen fuerzas mayores, o donde se produce mayor deformación).

La estimación del error se basa en la continuidad de las tensiones. Solidworks calcula la media del valor de las tensiones en todos los nodos de la malla y compara el valor de la tensión en cada uno de los nodos. El error es la diferencia entre el valor medio y el valor en cada nodo.

INFORMACIÓN MALLA	
Tipo de malla	Malla sólida, tipo H.
Malla utilizada	Malla estándar
Puntos jacobianos	4



INFORMACIÓN MALLA	
Tamaño de elementos	0,75 mm
Tolerancia	0.0375 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	1.409.180
Número total de elementos	909476
Coficiente máximo de aspecto	23.993
% de elementos con cociente de aspecto es < 3	99.5
% de elementos con cociente de aspecto es > 10	0.0274

Tabla N° 2: "Información malla para simulación estática mediante elementos finitos".

Fuente: elaboración propia.

4.3.1.3 Cargas y sujeciones para simulación estática

Para la carga, se consideró una fuerza de 218 N, dato obtenido conforme a promedio de pruebas dinámicas obtenidas a través de la ejecución del tiro de polígono y el uso de celdas de carga, en dependencias de FAMA E. Para evitar que el modelo se desplazase luego de que una carga actúe sobre ella, se definió un comportamiento conforme a ocho aristas del tipo geometría fija, fijando, de esta manera, los grados de libertad de traslación y rotación, como cero en el sólido seleccionado. Este tipo de sujeción no requiere seleccionar la dirección en que se aplica la restricción, ya que restringe todos los grados de libertad (tres grados de libertad de traslación y tres grados de libertad de rotación) (Figura N° 9).

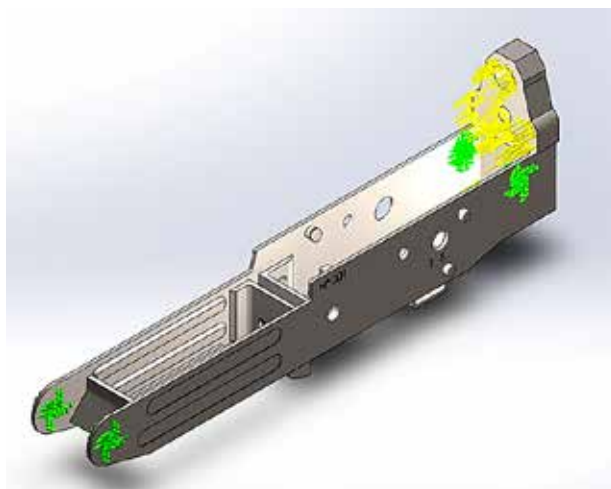


Figura N° 9: "Asignación de cargas/sujeciones monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

4.3.1.4 Resultados del estudio estático

A continuación se presentan los resultados del estudio estático, representados por cinco elementos: tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias, factor de seguridad y percepción de diseño.

En la Figura N° 10, se observa el resultado de las tensiones producto del análisis estático desarrollado, los resultados del modelo deformado y los colores que definen los errores. Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las mayores tensiones, mientras que los colores más fríos (azules, verdes), representan las menores tensiones en el modelo, de acuerdo con los resultados el modelo simulado presenta muy bajas tensiones.

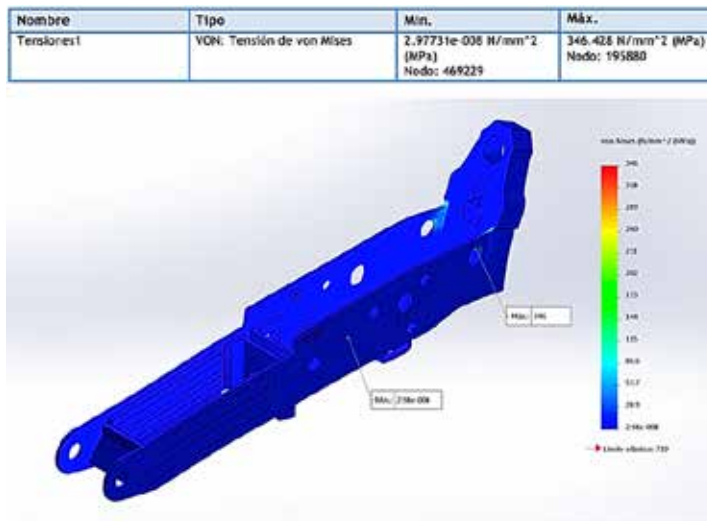


Figura N° 10: "Resultado de tensiones monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

En la Figura N° 11 se aprecian los resultados y los colores que definen los desplazamientos resultantes (URES) de cada uno de los nodos (mm) producto de las restricciones establecidas. Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las zonas con mayores desplazamientos, mientras que los colores más fríos (azules, verdes) representan las zonas que prácticamente no se han desplazado. El valor mínimo observado ocurre en el nodo 1398 con 0 mm de desplazamiento resultante y un valor máximo de 0,0065835 mm en el nodo 201.742.

En la Figura N° 12 se aprecian los resultados de las deformaciones unitarias sobre el modelo simulado. Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las zonas con mayores



deformaciones mientras que los colores más fríos (azules, verdes) representan las zonas que prácticamente no se han deformado.

Se concluye que los resultados obtenidos de la simulación muestran que las tensiones y deformaciones a las que se sometió el cajón de mecanismos monobloque diseñado a través de las sujeciones establecidas y una carga en la placa posterior correspondiente a 218,13 N, son aceptables y no presentan ningún tipo de problema; por lo tanto, el diseño se considera adecuado y en condiciones de iniciar su validación.

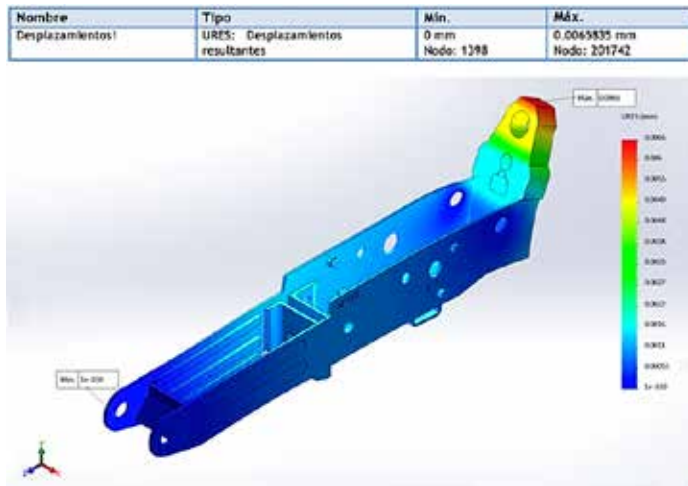


Figura N° 11: "Resultado de desplazamiento monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

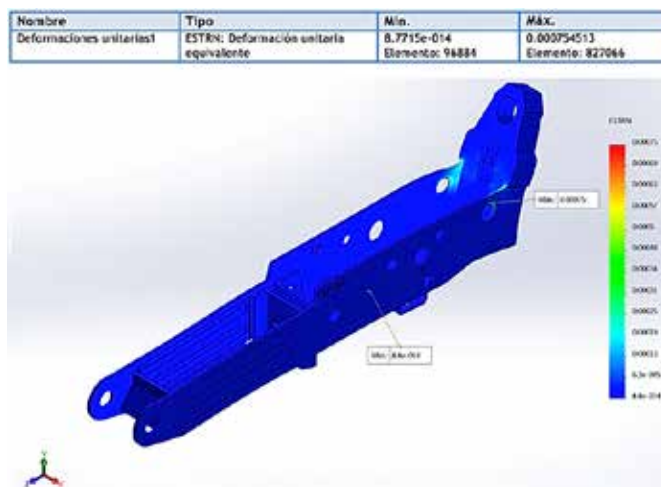


Figura N° 12: "Resultado de las deformación unitaria monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.



5. VALIDACIÓN Y DISEÑO PRELIMINAR

5.1 Evaluación funcional del diseño simulado (Figura N° 13)

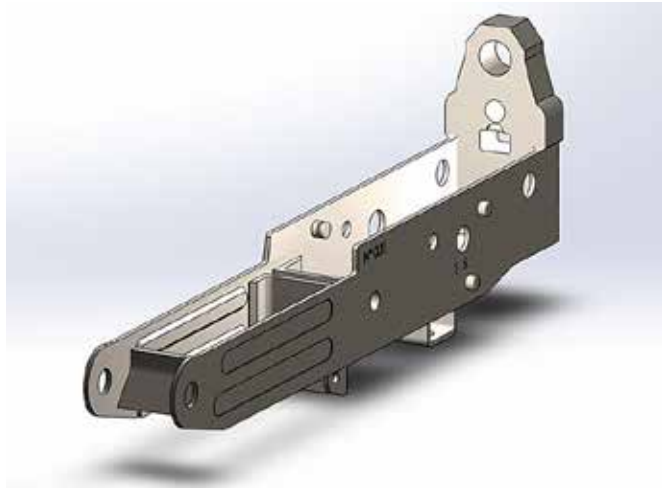


Figura N° 13: “Modelo cajón de mecanismos monobloque SG 542-1”.

Fuente: elaboración propia.

Para la evaluación funcional del diseño simulado, se utilizó la herramienta de Solidworks Simulation Fatiga, la que considera la aplicación de sucesos de fatiga, a través de las concentraciones de tensiones sobre la pieza, la definición parametrizada por curva S-N y un método Soderberg, conforme a acero SAE 4340 normalizado. De acuerdo con lo anterior, se considerarán pruebas cíclicas con carga aleatoria de amplitud constante, conforme a la siguiente Tabla N° 3.

PARÁMETROS VALIDACIÓN ESTUDIO DE FATIGA	
Cajón de Mecanismos Monobloque SG 542-1	
Propiedades Volumétricas	Valor
Masa	0,422595 Kg
Volumen	5,3833e-005 m ³
Densidad	7850 Kg/m ³
Peso	4.14143 N
Propiedades del Material	
Nombre	Características
Acero AISI 4340	Normalizado
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Criterio de error	Tensión de Von Mises
Tipo de curva S-N	AISI/SAE 4340



PARÁMETROS VALIDACIÓN ESTUDIO DE FATIGA			
Propiedades del Estudio			
Tipo de Análisis		Observaciones	
Factor de reducción (Kf)		0,5	
Tensión equivalente		Von Mises	
Interacción entre sucesos		Sin interacción	
Corrección de tensión media		Soderberg	
Factor de escala		Tipo 1	
Resultado del Estudio			
Nº	TIPO PRUEBA (CICLOS)	TIPO DE CARGA	RESULTADOS
1	20.000	Base en 0 (LR = 0)	No hay rotura por fatiga

Tabla Nº 3: "Parámetros validación estudio de fatiga".

Fuente: elaboración propia.

5.1.1.1 Análisis de resultados validación por ciclos

Del análisis de la simulación de fatiga, se concluye que los colores representan el porcentaje de vida consumido por la fatiga en cada una de las zonas. A los 20.000 ciclos (Figura Nº 14), se observa que el cajón diseñado resiste completamente a las pruebas de fatiga sometidas. El factor de daño está representado por el porcentaje de daño que acumula el modelo de la pieza simulada. Un factor de daño menor a uno indica que la pieza ha fallado durante el tiempo determinado de la carga aleatoria.

El trazado de vida, representa el número de ciclos de carga que produce el modelo simulado de rotura por fatiga. El estudio comenzó con una prueba de 20.000 ciclos, ensayo que fue resistido completamente; este valor, en general, se considera como vida útil infinita.

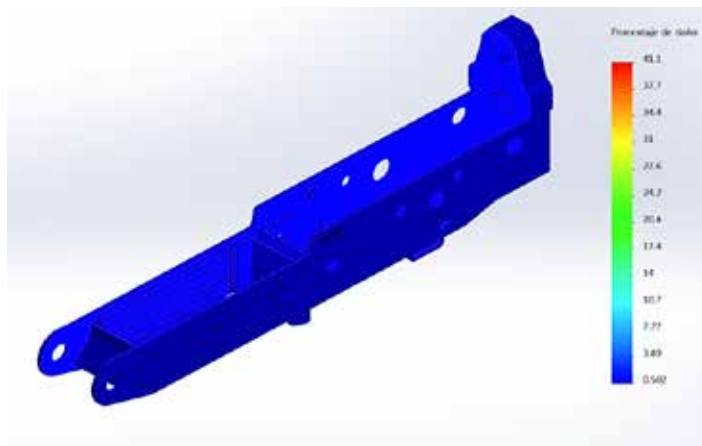


Figura Nº 14: "Imagen % de daño 20.000 ciclos monobloque

Fuente: elaboración propia.



5.2 Determinación de ajustes finales del modelo

5.2.1 Integración de componentes internos

El análisis de ensamble permite estudiar las interferencias, el choque entre componentes, simular el conjunto mecánico y analizarlo dinámicamente. Su objetivo final es detectar diseños inadecuados y ajustarlos para obtener un óptimo funcionamiento del mecanismo. A continuación se integran los componentes internos del cajón de mecanismos monobloque, a través de la herramienta de ensamble de Solidworks para el fusil SG 542-1, de acuerdo a Figura N° 15.

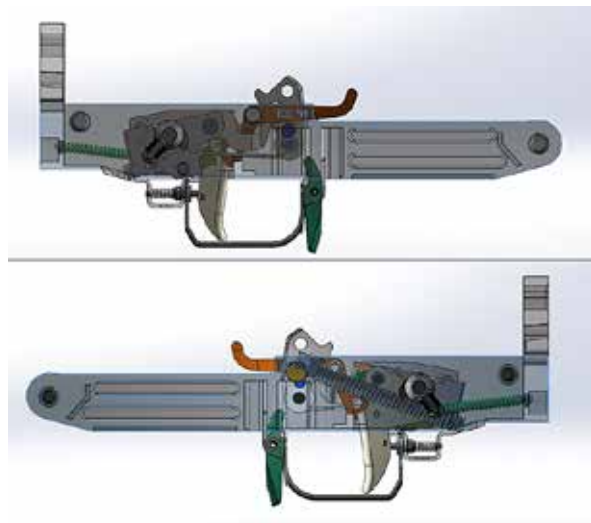


Figura N° 15: "Vistas de sección laterales ensamble componentes internos".

Fuente: elaboración propia.

5.3 Impresión 3D de prototipo final

La tecnología actual de prototipado permite imprimir modelos 3D en materiales muy variados, a partir de la reproducción de un archivo con extensión .Stl. La pieza diseñada a través de la herramienta computacional debe ser sólida y hermética para que pueda ser impresa. Existen variados materiales en el mercado, de acuerdo con propiedades mecánicas requeridas para lograr los objetivos del diseño.

El material seleccionado para la impresión 3D del prototipo fue ONYX, el que cuenta con el doble de resistencia que el ABS o PLA, lo que permite piezas más resistentes, lisas y opacas, características relevantes para la posterior mecanización e integración de componentes internos.



5.3.1 Prototipo preliminar

La impresión del prototipo se realizó en la empresa Tresdp, donde se empleó una impresora de alta resistencia Markforged, con una resolución de 100 micras (Figura N° 16). Los prototipos impresos en 3D en material ONYX, terminados, se presentan en la Figura N° 17.



Figura N° 16: "Prototipo impresión 3D en Onyx, impresora Markforged".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 17: "Imagen prototipos impresión 3D en Onyx".

Fuente: archivo del autor.



5.3.2 Ajuste de prototipo en fusil SG 542-1

El prototipo en ONYX del cajón de mecanismos diseñado se ensambló (sin sus componentes internos) al fusil SG 542-1, número de serie 38403, conforme a Figura N° 18, en dependencias de la Sala de Armamento de la Academia Politécnica Militar.



Figura N° 18: "Ajuste prototipo impresión 3D en Onyx con fusil SG 542-1".

Fuente: archivo del autor.

5.3.3 Ensamble de componentes internos en prototipo

Se verificó el ensamblaje y funcionalidad de los componentes internos del prototipo sin disparar (manualmente), en la Planta de Armamento Menor en FAMAe, conforme a Figura N° 19.



Figura N° 19: "Vista lateral ensamble componentes internos en prototipo".

Fuente: archivo del autor.



6. CONCLUSIONES

Como se logró evidenciar, el diseño preliminar de un cajón de los mecanismos para el fusil SG 542-1, de estructura monobloque en acero SAE 4340, trabajado en centros de mecanizado CNC, fue el resultado del desarrollo de diversas etapas que tuvieron prósperos resultados.

En primer lugar, se analizaron los antecedentes técnicos y de fabricación de, por una parte, el actual fusil SG 542-1 calibre 7,62 x 51 mm FAMAE, cuyo cajón de mecanismos es fabricado, desde hace casi cuatro décadas, empleando láminas plegadas, soldadas y mecanizadas y, por otra, del cajón de mecanismos del fusil Galil ACE 22 NC, calibre 5,56x45 mm IWI, fabricado recientemente por FAMAE, bajo licencia IWI, sobre la base de un monobloque de acero trabajado en centros de mecanizado.

Posteriormente se determinaron, de forma experimental, los esfuerzos dinámicos, al cargar el arma y al disparar, sobre el cajón de mecanismos del fusil SG 542-1, mediante celdas de carga y sensores de aceleración. A partir de lo anterior y, de la geometría verificada de tal cajón, se determinaron las fuerzas actuantes sobre distintas partes de este último.

El análisis planimétrico del fusil SG 542-1 permitió establecer los datos de entrada esenciales para modelar el cajón de mecanismos de esta arma, ahora en versión monobloque, considerando acero 4340 como materia prima. De acuerdo con lo anterior, se diseñó, mediante el uso de *softwares* de diseño (CAD) y de ingeniería (CAE, método de elementos finitos), el cajón de mecanismos monobloque del fusil SG 542-1, en su planimetría y resistencia mecánica (incluyendo fatiga), así como en la funcionalidad de los mecanismos que debe contener.

Luego se fabricó, mediante impresión 3D en plástico ONIX, un prototipo del cajón de mecanismos diseñado, con el que se validó su compatibilidad geométrica y funcional (sin disparo) con los otros componentes del mecanismo de disparo del fusil SG 542-1.

El valor de uso del presente trabajo se expresa bajo diferentes formas. Primero, los resultados podrían ser considerados directamente por FAMAE para la modernización (upgrade) de los fusiles SG 542-1 actualmente de cargo en la Institución. Segundo, la metodología empleada, basada en la aplicación de modernas herramientas de diseño asistido por computador (CAD), ingeniería asistida por computador (CAE) y prototipado rápido por impresión 3D, es utilizable para la modernización de la manufactura de los cajones de mecanismos de otras armas livianas fabricadas por FAMAE. Por último, cabe destacar que esta metodología es aplicable al diseño eficiente de una amplia variedad de componentes mecánicos.



BIBLIOGRAFÍA

- Academia Politécnica Militar (2015). *Manual de Memorias, Tesis o Actividad Equivalente*. Santiago, Chile: Academia Politécnica Militar.
- American Standart for Testing and Materials. *ASTM A370-15: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials. *ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials. *ASTM E18-15: Stantard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials. *ASTM E45-13: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials (2013). *ASTM E112-13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 28 páginas. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials (2013). *ASTM E140-12b: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness*. 25 páginas. Estados Unidos.
- División Educación (2011). *Guía para la redacción de citas bibliográficas*. Santiago, Chile: División Educación.
- Ejército de Chile (2004). CA.Is.C.(P)880. *Cartilla de Instrucción FUSIL SG 542 FAMAe*. Santiago, Chile: Fábricas y Maestranzas del Ejército.
- González, S. G. (2017). *El gran libro de Solidworks SIMULATION* (1ª edición, Vol. I). Barcelona, España: Marcombo.
- González, S. G. (2015). *El Gran libro de Solidworks* (2ª edición). Ciudad de México, México: Alfaomega-Marcombo.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2006). *Metodología de la Investigación*. Ciudad de México, México: Infagon.



Israel Weapon Industries (IWI) Ltd. (s.f.). Manual de Mantenimiento de Niveles A y B. Galil ACE Modelo: 22 NC Fusil de asalto de 5,56 mm, 72. Recuperado de: www.iwi.net.

Pastor, Ó. (2017). *Diseño preliminar de un cajón de los mecanismos monobloque de aleación ferrosa para el fusil SG 542-1 FAMAE*. (Memoria para optar al título de Ingeniero Politécnico Militar, Mención Armamento). Academia Politécnica Militar, Santiago de Chile.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SIMULADOR
PARA LA INSTRUCCIÓN Y ENTRENAMIENTO DEL
PELOTÓN Y SECCIÓN DE TANQUES LEOPARD 2A4**

MAY. ALBERTO VILLARROEL RIVERA



CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SIMULADOR PARA LA INSTRUCCIÓN Y ENTRENAMIENTO DEL PELOTÓN Y SECCIÓN DE TANQUES LEOPARD 2A4

MAY. Alberto Villarroel Rivera¹

Resumen: *las tareas inherentes a la formación, instrucción y entrenamiento de un pelotón de tanques, en el contexto de la guerra de maniobra, son unas de las más complejas y onerosas de lograr, existiendo una brecha de capacidad en el material de simulación disponible para su desarrollo. Considerando que parte importante de la eficiencia de combate de los grupos blindados depende de sus pelotones, se propone realizar la “Construcción de un simulador de nivel pelotón”, con el objetivo de incrementar las herramientas que permitan formar a estas unidades en las funciones, procesos, tácticas y técnicas necesarias para su empleo en el combate. El objetivo del presente artículo es describir una propuesta para la construcción de dicho simulador.*

Palabras clave: *fuerza terrestre, conducción del tiro, eficiencia de combate, simulación, pericia.*

Abstract: *in the maneuver warfare context, the inherent tasks for education, instruction and training of a tank platoon are some of the most complex and burdensome to achieve, finding a capacity breach in simulation’s material available for their development. Considering that an important part of the combat efficiency of armored groups depends on their platoons, it is suggested to carry out the “setting-up of a simulator for a platoon level”, with the aim of increasing the tools which allow to educate these units in necessary functions, processes, tactics and techniques for its implementation in combat. The purpose of this article is to describe a proposal for the construction of the simulator above.*

Keywords: *land force, firing range, combat efficiency, simulation, expertise.*

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas Tecnológicos de la Información y Comunicación, mención Informática y Computación. Diplomado en Innovación Tecnológica.



1. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

El Ejército de Chile cuenta con material blindado moderno y con gran capacidad, sumado a personal altamente calificado y procesos de formación de nivel mundial. No obstante esto podría generar una falsa sensación, en el sentido de hacer pensar a los integrantes de la Institución que, derivado de la tecnología, el tiro de tanque se ha convertido en una tarea técnica de poca complejidad.

Un factor relevante a considerar en relación con el nivel alcanzado por las tripulaciones de tanque del Ejército de Chile es que lo anterior no es producto del azar, ya que obedece a un trabajo riguroso y permanente, a una exigente formación y a disposiciones claras de que todos los integrantes de estas unidades deben alcanzar sus competencias como comandantes y artilleros en el Centro de Entrenamiento de Combate Acorazado (CECOMBAC).

Al igual que cualquier capacidad adquirida, para lograr los máximos rendimientos en el alistamiento operacional de las tripulaciones de tanque, se requiere de un entrenamiento lo más cercano a la realidad, siendo en este punto donde se identifica una brecha de capacidad. Efectivamente, al nivel de la tripulación del tanque se cuenta con muchos medios de entrenamiento, lo que entrega como resultado un alto estándar de efectividad. Sin embargo, esto no se replica al nivel pelotón,² siendo este el nivel más complejo de entrenar, sumado a que, en la actualidad, no cuenta con un sistema de simulación que apoye su instrucción y entrenamiento.

Las unidades definen sus objetivos de entrenamiento (tareas, condiciones de ejecución y requisitos por alcanzar), en función a las tareas esenciales de la misión (TEM) que la unidad debe lograr con la finalidad de cumplir con éxito las misiones que le correspondan en su empleo táctico (Ejército de Chile, MDO-60304, 2014, p. 13).

Para lograr formar a los comandantes de estas unidades, se requiere incorporar procesos de entrenamiento eficientes y conducentes al propósito deseado, debido a que, conforme a lo definido en la reglamentación, el pelotón de tanques debe desarrollar más de 25 tareas. Lo anterior no puede ser logrado sin el desarrollo de un proceso de mecanización que permita la consolidación del aprendizaje. Desfavorablemente y como pasa en gran parte de los ejércitos del mundo, existen limitaciones para este trabajo en terreno, dentro de las que se destacan: los perfiles de uso, disponibilidad de muni-

2 *“La tripulación conduce el fuego en combate en el marco de la unidad de fuego. La unidad de fuego es por principio el pelotón, en caso especial la sección o el escuadrón”* (Ejército de Chile, MDO-80302, 2014, p. 20).



ción y combustible, restricciones de terrenos, estado operacional del material, falta de repuestos e insumos, etc.

En la actualidad, gran parte del entrenamiento de carácter colectivo de las unidades de tanques se debe desarrollar en terreno, con las complejidades y empleo de recursos propios de esta actividad. Por tal razón, se propone incorporar un eslabón más en la cadena de entrenamiento de los pelotones de tanques de la fuerza acorazada del Ejército. Este eslabón estaría constituido por el desarrollo de un sistema de simulación en aula, antes de pasar a la etapa de aplicación en terreno, basado en un simulador de combate táctico-técnico para pelotones de tanques.

Dicha etapa anterior a la ejecución de ejercicios en terreno, no busca reemplazar el entrenamiento real con medios blindados. Por el contrario, su propósito es preparar en mejor forma a los pelotones de tanques por medio de la simulación, de modo que cuando las tripulaciones de tanques lleguen a la etapa de ejercicios en terreno, saquen mayor provecho de los recursos disponibles, mediante la ejecución práctica de las TEMs ya adquiridas de forma virtual por cada unidad.

Complementariamente, podemos agregar que bajo el principio de empleo en masa,³ los tanques no deben combatir solos, debido a que los blancos que se presentan en el combate serán mucho más complejos, siendo fundamental la capacidad de designarlos rápidamente en función de las bocas de fuego de los tanques empleados en la acción. A modo de ejemplo: si un mismo objetivo es impactado al primer tiro por los cuatro tanques de un pelotón de forma simultánea por falta de coordinación, se entendería que la efectividad⁴ de cada tanque corresponde al 100%, pero el resultado del pelotón será de un 25%, ya que esta unidad debió consumir 4 bombas de 120 mm para destruir un solo blanco, descuidando, además, el resto de los objetivos presentes, lo que se encuentra muy lejos del resultado que se lograría si se calculara el promedio de los rendimientos individuales. Claramente el ejemplo antes descrito podría ser discutible, conforme a las técnicas de tiro, las disposiciones del comandante del pelotón, la peligrosidad de los objetivos, las líneas de visión, el compartimentaje del terreno o por otros factores.

En la Figura N° 1 se resumen las características que debe tener un comandante de unidad blindada.

3 Significa que mientras mayor cantidad de medios blindados se empleen reunidos, mayor será el efecto de choque y la acción psicológica y menor serán las posibilidades de reacción adversaria (Ejército de Chile, MDO-6030, 2012, pp. 1-3).

4 En este contexto, se entenderá como efectividad al porcentaje obtenido de la siguiente fórmula ((Blancos destruidos/ munición consumida) *100). Como ejemplo, si para destruir 7 objetivos se consumieron 8 bombas, la efectividad será de $((7/8) *100) = 87,5\%$.



Figura N° 1: "Características de un comandante de material blindado".

Fuente: elaboración propia.

La etapa en las que se propone incorporar el simulador de pelotón es una vez superado el trabajo teórico y antes de participar de ejercicios en terreno de cualquier nivel, tal como se observa en la Figura N° 2, para fortalecer, con esto, la coordinación, la comunicación y la conducción.



Figura N° 2: "Etapa de incorporación".

Fuente: elaboración propia.

La incorporación de un simulador de estas características incrementaría la capacidad de entrenar el tiro y el desplazamiento, lo que, en la actualidad, no es cubierto con los simuladores de los Subcentros de los Grupos Blindados y requieren del uso del material.



Esto a partir de la experiencia de quien suscribe como instructor del CECOMBAC, entre los años 2007 y 2001. El objetivo es incorporar un paso previo al uso de los tanques, con la finalidad de lograr que se aproveche más el trabajo en terreno y eliminar las restricciones propias de los perfiles de uso, debido a que el simulador le entregará al pelotón la posibilidad de disparar y desplazarse lo que requiera para su entrenamiento.

2. ANÁLISIS SITUACIONAL DE LAS CAUSAS Y LOS EFECTOS DEL PROBLEMA IDENTIFICADO

Para conceptualizar el contexto descrito precedentemente, se ha utilizado el diagrama de causa-efecto⁵ (Figura N° 3), el que tiene por objeto poder identificar claramente las causas que generan el problema que se propone investigar y, así, revelar los aspectos mejorables a través de la construcción de un simulador de nivel pelotón. Lo anterior se particularizará durante el presente trabajo, con la intención de minimizar los efectos que aquí se definen.

Cabe mencionar que, para no sustentar este trabajo solamente en la visión del autor, este fue revisado por integrantes de la Institución, quienes tienen relación directa con el nivel de entrenamiento que deben alcanzar los pelotones de tanques.



Figura N° 3: "Árbol de causa y efecto para determinar el problema".

Fuente: elaboración propia.

5 Se entiende como relación de ideas o hechos en forma de causa y efecto o de otra manera real o lógica (Moliner, 1990, p. 704).



3. QUÉ SE DEBE REALIZAR COMO INSTITUCIÓN

Se propone complementar la instrucción de las tripulaciones de tanque con el entrenamiento de nivel pelotón, debido a que la aptitud para el combate de un tanque concebido de forma aislada produce limitaciones en el alistamiento operacional de la unidad. Por este motivo, se estima necesario que los sistemas de instrucción y entrenamiento eliminen de su registro histórico la opción de ver un tanque disparando en forma independiente, por lo que, a partir de los cursos⁶ básicos y avanzados de oficial de arma y de sargentos, se debería hablar de la conducción de los fuegos por niveles, aspecto que resulta más complejo, debido a que las unidades deben destruir todos los blancos presentes en el espacio de batalla, de forma rápida, sin pausa, sin error, sin flancos descubiertos, sin descoordinaciones, cambiando formaciones y ejecutando técnicas de combate.

Lo anterior evidencia un contexto más claro y amplio de lo que las unidades de tanques del Ejército de Chile deben entrenar. Por tal razón, surge la necesidad de construir un simulador de nivel pelotón de tanques, diseñado a la medida de los requerimientos del soldado chileno, con lecciones que se realicen en terrenos nacionales, que presente objetivos existentes en la posibilidad y que permita a los pelotones lograr eficiencia en su empleo.

Las preguntas que se generaron para esta investigación fueron:

- ¿Cómo se pueden entrenar estas múltiples variables?
- ¿Cómo se generan las condiciones de estrés que vivirán los comandantes antes de resolver y ordenar?
- ¿Cómo se entrenan los comandantes para difundir estas órdenes de forma sencilla, simple y comprensible?
- ¿Cómo se logra la mecanización para que el pelotón sepa qué hacer incluso cuando se pierde la comunicación?
- ¿Es posible lograr un nivel óptimo solo con entrenamiento en terreno?

A lo antes descrito se debería sumar lo indicado en el MDO-60303:

la dinámica y velocidad que imprime actualmente el desarrollo del combate, con informaciones en tiempo real de la situación táctica que se vive, obligan al comandante del pelotón, en muchas circunstancias, a no ajustarse a procedimientos

6 Conforme al contexto del artículo, se entenderá por curso a los procesos de formación impartidos por la Institución en distintos niveles. En este caso, obedecen a cursos de nivel táctico en los que la incorporación de un sistema de simulación podría favorecer a la formación y al entrenamiento de los alumnos.



esquemáticos, los cuales terminarán siendo una guía más que un esquema rígido” (Ejército de Chile, 2012, pp.1-6).

3.1 EL MANDO EN EL PELOTÓN DE TANQUES

Lo anterior demuestra la necesidad de fortalecer los lazos tácticos, estandarización, uniformidad de criterios al interior del pelotón de tanques. Esto fundamenta la necesidad de construir un sistema de simulación⁷ de nivel sección y pelotón, que facilite la preparación de las unidades de acuerdo con los estándares que exige el Ejército.

Para alcanzar estos niveles de entrenamiento y, posteriormente, que estos se mantengan en el tiempo, es necesario contar con una herramienta de simulación que permita someter a las unidades a escenarios y lecciones lo más similares posibles a lo que podrían enfrentar y que este entrenamiento tenga un costo sostenible por la Institución.

Consecuentemente con lo anterior, se entiende que las unidades deberán ser sometidas a un sistema de instrucción y entrenamiento que se acerque a la realidad, para acostumbrar a los comandantes y a sus unidades a emitir y recibir órdenes, a resolver variadas situaciones y, a su vez, a entregar a los instructores de las unidades o profesores, la posibilidad de evaluar el desempeño.

Alcanzar este nivel de entrenamiento requerido, solo en períodos de terreno, tendría un costo demasiado alto; por otro lado, es algo que siempre se deberá realizar con la mayor frecuencia posible. En consecuencia, la incorporación de la simulación permitirá reducir costos y mejorar el entrenamiento de las unidades, favoreciendo el nivel de eficiencia de combate⁸ de los grupos blindados de la Fuerza Terrestre.

4. LA INCORPORACIÓN DE UN SIMULADOR ACERCARÁ A LAS TRIPULACIONES A NIVEL DE PERICIA NECESARIO

Alcanzar el nivel de pericia⁹ en algo y lograr que los integrantes de los pelotones la tengan, será el desafío que buscará la incorporación de un simulador de este nivel.

7 “La simulación es una herramienta que evoluciona, debido a la actividad de los aprendices y la actividad de los formadores, permitiendo capacitar a las tripulaciones en situaciones estresantes, sin riesgo real, gestionando una formación progresiva” (Fauquet y Nane, 2016, p. 7).

8 “Nivel de eficiencia de acuerdo con los estándares exigidos, de forma tal que la certificación lograda mantenga el nivel de alistamiento operacional de su unidad” (Ejército de Chile, MDO-60304, 2014, pp. 1-35).

9 “Sabiduría, práctica, experiencia y habilidad en una ciencia o arte” (Real Academia Española, 2018).



Conforme a lo que fue estudiado en múltiples fuentes, se entenderá que el tanquista tendrá pericia cuando se desempeñe correctamente en la ejecución de una tarea, resolviendo prácticamente, de forma mecánica, las dificultades que se le presenten, producto de su formación, entrenamiento y experiencia.

Muchas personas piensan erróneamente que, para lograr esto, se requiere solo de talento y que es algo innato, pero numerosos estudios han revelado la necesidad de un trabajo deliberado y continuado en el tiempo para construir esta capacidad.

La incorporación de este sistema de simulación permitirá someter a las unidades a “la práctica deliberada” (Fundación Repsol, 2018) lo que corresponde a una forma de actividad muy especial que se diferencia de la mera experiencia y la ejercitación mecánica. Lo anterior no es inherentemente placentero, ya que no implica una simple ejecución o repetición de destrezas ya alcanzadas, sino que corresponde a un intento repetido de ir más allá del nivel actual, lo que conlleva fracasos frecuentes.

La única forma de saber el nivel actual será su medición empírica y es aquí donde nuevamente se destaca lo valioso de contar con un sistema de simulación, el que permitirá lograr evaluar a las tripulaciones y lograr que estas sean capaces de identificar la información relevante, organizando sus conocimientos, a fin de conseguir resolver problemas de manera más eficaz y en menor tiempo que el adversario.

Para esto se buscará una solución innovadora,¹⁰ lo que se entenderá para este artículo como la creación de algo nuevo que implique un impacto en un entorno dado. Con la finalidad de cumplir con lo anterior, se propone la incorporación de la simulación constructiva y virtual, lo que permitirá a las tripulaciones enfrentar un entrenamiento para llegar a sus límites y evidenciar su mejora a través del entrenamiento progresivo y que, aprovechando la retroalimentación, aporte con experiencias significativas.¹¹

5. DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA

En esta transición de lo teórico a lo práctico es importante ser capaces de definir qué simulador construir y qué tareas se deberán cumplir para mejorar las competencias de los comandantes de pelotones de tanques. Para lograr esto, se deben considerar las competencias resumidas previamente en la Figura N° 1, conforme a la doctrina institucional, por lo que se realizó un análisis de los siguientes reglamentos:

10 De innovar: “mudar o alterar algo, introduciendo novedades” (RAE, 2018).

11 “Que tiene importancia por representar o significar algo” (RAE, 2018).



- MDO-60303 “Manual de tanque y pelotón de tanques”.
- MDO-60304 “Manual de entrenamiento de tanque y pelotón de tanques”.
- MDO-80302 “Manual de Tiro de Tanques”.

Específicamente, en el MDO-60304, punto 1, páginas 1-6, 1-7 y 1-8, se detallan los principios de la instrucción y entrenamiento, los que servirán de guía para este proyecto, al facilitar el estudio de los factores a considerar. Estos principios son:

1. Desarrollar procesos de acuerdo con la realidad nacional.
2. Entrenar conforme a la misión de la unidad.
3. Entrenar conforme a la doctrina vigente.
4. Entrenar para lograr y mantener la especialización.
5. Entrenar para lograr habilidades de combate.
6. Entrenar con integración de unidades.
7. Entrenar con un esfuerzo compartido.
8. Desarrollar el proceso con flexibilidad y retroalimentación.
9. Desarrollar la capacidad reflexiva de los comandantes y soldados.
10. Entrenar respetando las normas de seguridad.

Lo anterior será considerado en el diseño. Finalmente, todo esto se sumará a las tareas que se han considerado producto del trabajo con especialistas en el material Leopard 2A4, definiéndose las siguientes misiones para el simulador:

1. Permitir el entrenamiento de la sección y el pelotón de tanques, habilitando estaciones de los puestos de comandante, artillero y conductor.
2. Entrenar las comunicaciones.
3. Entrenar técnicas y procedimientos de combate, el tiro diurno y la conducción del tiro nocturno o con limitadas condiciones de visibilidad.
4. Realizar y corregir la ejecución de las acciones tácticas fundamentales, complementarias y en el combate móvil cercano y lejano.
5. Permitirá desarrollar lecciones en los terrenos propios de cada unidad respetando su morfología y vegetación.

6. OBJETIVO DE LA INCORPORACIÓN DEL SIMULADOR

Como se indicó precedentemente, el objetivo de este simulador es sumar capacidades al sistema de entrenamiento y no reemplazar otras actividades, por lo que es fundamental continuar con los períodos de terreno, tiro y combate simulado con BT-41, tiro con munición de guerra, etc.



No obstante, es en el proceso de instrucción y entrenamiento donde se evidencia una brecha de capacidad, la que hace necesaria esta instancia de investigación y desarrollo, con un trabajo multidisciplinario, que entregue como resultado una solución innovadora y que, a través de la tecnología, dé respuesta a un problema concreto de la Fuerza Terrestre.

Lo descrito precedentemente sustenta la investigación que se presenta, la que busca el apoyo del Sistema de Investigación del Ejército (SIDE) para la construcción de un prototipo y llevar a cabo el trabajo aplicado, que integre componentes de *software* y *hardware* existentes en el mercado, además del diseño y la configuración de estaciones y lecciones.

Lo antes descrito tendrá como objetivo entregar a la Fuerza Terrestre resultados en el corto plazo y realizar mejoras en función a la experiencia y uso del sistema.

Este trabajo se enmarca en el ámbito de las “Ciencias militares, combate, generación de doctrina y docencia”, por lo que su objetivo medular es una investigación para el combate, razón de ser de este tipo de unidades. No obstante, permitirá el apoyo a procesos docentes y la revisión empírica de la doctrina a través de la ejecución repetida de lecciones de simulación.

7. DISEÑO DEL SIMULADOR

El objetivo es el diseño y la construcción de un prototipo de simulador que utilice *software* y *hardware* ya existentes en el mercado, lo que se integrará con estructuras acordes, en una red que permita entrenar e instruir a un pelotón o sección, con “*joysticks*”¹² de los mandos de los comandantes y artilleros para realizar técnicas de tiro. Sumado a lo anterior, se incorporará un módulo para conductores, lo que permitirá el entrenamiento de diversos desplazamientos y formaciones. Por otra parte, se realizará la selección de terrenos y amenazas acordes a las zonas geográficas propias de cada unidad, lo que favorecerá que sea más realista. Finalmente, se habilitará un sistema de comunicaciones y se diseñarán las lecciones conforme a la doctrina.

Lo anterior buscará una rápida incorporación de esta capacidad en la Fuerza Terrestre, para lo cual se utilizarán “Métodos Ágiles Lean”,¹³ el que se puede resumir en tres puntos:

-
- 12 Nota de autor: un *joystick* corresponde a un dispositivo que posee las mismas características de forma y movimientos que el mando real del tanque. La idea de su uso en este simulador es que las tripulaciones mecanicen los procedimientos sin percibir variaciones técnicas, permitiendo replicar el nivel que alcancen en el material real.
- 13 “Dado que define más una filosofía de trabajo que un conjunto de técnicas, herramientas o procesos, es posible adaptarlo a otras esferas de la actividad humana” (Lasa et al., 2017, p. 324).

- a. Fabricar solo lo necesario.
- b. Eliminar lo que no añade valor.
- c. Cero defectos.

Lo anterior permitirá dar por terminada la fase inicial, en una ventana de un año de desarrollo y dos años de implementación, siempre que se cuente con disponibilidad de tiempo, medios y recursos económicos necesarios para su ejecución.

Como una forma de poder dimensionar el desarrollo de las estaciones y los módulos se ha realizado su diseño de arquitectura,¹⁴ el que representa los componentes para cada simulador de nivel tanque en la Figura N° 4.

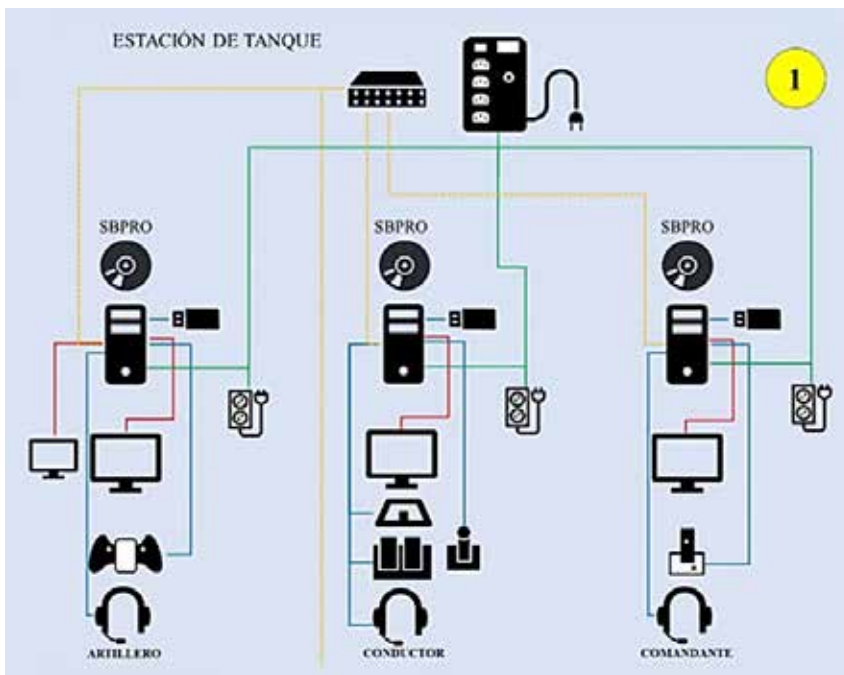


Figura N° 4: "Diseño de la arquitectura a nivel tanque".

Fuente: elaboración propia.

El diseño del simulador a nivel pelotón integra a cuatro tanques y una estación de dirección. Para tener una idea general, se presenta la Figura N° 5. Se debe entender que los N° 1, N° 2, N° 3 y N° 4 corresponden a los componentes indicados en la Figura N° 4.

¹⁴ "La arquitectura es una representación que permite 1) Analizar la efectividad del diseño para cumplir los requerimientos establecidos, 2) Considerar alternativas arquitectónicas en una etapa en la que hacer cambios al diseño es relativamente fácil y 3) Reducir riesgos asociados a la construcción" (Pressman, 2010, p. 207).

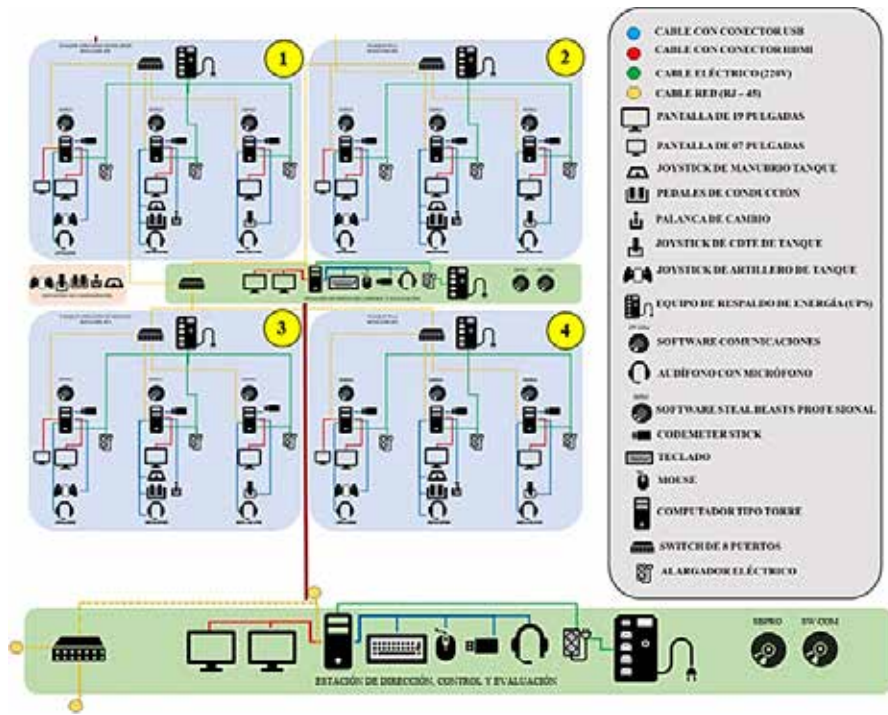


Figura N° 5: "Diseño de la arquitectura de componentes del simulador".

Fuente: elaboración propia.

Los componentes del sistema para cada grupo blindado corresponden a:

1. Catorce (14) licencias de *software* de simulación virtual, para la edición de terrenos y lecciones.
2. Una (1) licencia de *software* para simular comunicaciones.
3. Cinco (5) mandos de comandante con conexión USB o similar.
4. Cinco (5) mandos de artillero con conexión USB o similar.
5. Sillas y estructuras para las estaciones.
6. Un (1) puesto de control y evaluación.
7. Trece (13) PC de torre, pantallas, teclados y mouse.
8. Cinco (5) sistemas de respaldo UPS.
9. Una (1) pantalla de 40 pulgadas para el control de lecciones.
10. Veinte (20) metros de cable de red.
11. Un (1) cajón de arenas con el material para su uso.
12. Manuales para lectura y estudio:
 - a. Cinco (5) MDO-60304.
 - b. Cinco (5) MDO-60304.
 - c. Cinco (5) MDO-80302.



Todo lo anteriormente expuesto será trabajado bajo la filosofía de Kaisen¹⁵ o mejora continua, lo que sumado a qué saber,¹⁶ cómo hacerlo y cómo replicarlo, será obtenido por medio del presente trabajo por parte de la Institución, lo que permitirá en un futuro cercano poder incorporar nuevas pantallas en los puestos del comandante, las que puedan simular los sistemas de mando y control o habilitar funcionalidades en los paneles de control, entre otras.

Un aspecto muy relevante que se podrá trabajar con este simulador está constituido por las intercomunicaciones, telecomunicaciones y comunicaciones a través de sistemas auxiliares como banderolas y linternas. Esto se podrá realizar a raíz de la incorporación de un *software*, el que será configurado por tanques habilitados con audífonos que simularán los cascos de los tripulantes.

Cada estación estará compuesta por tres módulos, los que se han diseñado a través de modelos 3D a similitud de los puestos reales y se observan en la Figura N° 6.

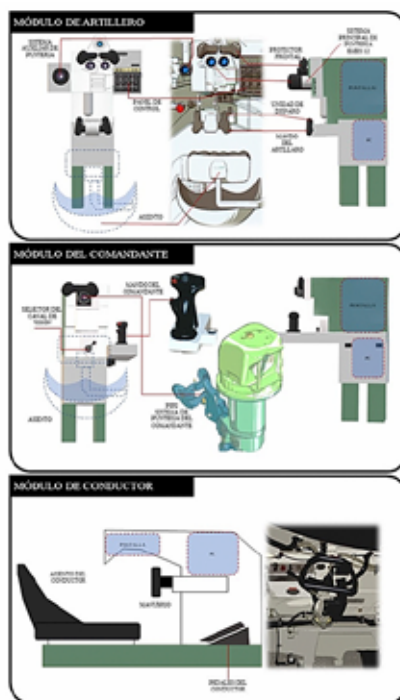


Figura N° 6: "Diseño de los módulos para cada estación".

Fuente: elaboración propia.

15 "Kaisen es un término de origen japonés que se usa para referirse a la mejora continua a través de acciones prácticas, entendiéndose que esto no solo queda en un contexto teórico" (Lasa et al., 2017, p. 324).

16 "Tener habilidad o capacidad para hacer algo" (RAE, 2018).



En relación con este diseño, se han realizado anteriormente investigaciones para el desarrollo de mandos de material Leopard 2A4, por parte del Centro de Modelación y Simulación del Ejército (CEMSE), por lo que se propone que, de ser aprobado este proyecto, sea desarrollado en forma conjunta con esta unidad dentro de lo posible, debido a su capacidad y experiencia en materias similares.

8. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO Y SOPORTE

Para poder mantener en el tiempo este simulador, se propone incorporarlo a los sistemas de simulación institucionales, lo que permitirá realizar la solicitud de recurso para su mantenimiento, actualización y reparaciones.

Si se analiza prospectivamente este sistema, su costo será justificado por las capacidades que incorporará a la Fuerza Terrestre, su aporte como una herramienta de control y registro de desempeño de los pelotones y su capacidad de incentivar la autopreparación y el entrenamiento que realizan los comandantes de pelotón con sus unidades.

Este trabajo se prevé que tendrá una duración de tres años, donde:

1. Primer año: diseño de prototipo, verificación e instalación en unidad piloto “Grupo Vencedores” con el objetivo de desarrollar las pruebas de validación y mejoras.
2. Segundo año: desarrollo e instalación del simulador en la Escuela de Caballería Blindada y el grupo “Guías”.
3. Tercer año: desarrollo e instalación del simulador en el grupo “Exploradores”.

9. OPINIÓN DE MANDOS RELACIONADOS CON LA INSTRUCCIÓN Y EL ENTRENAMIENTO DE LAS UNIDADES DE TANQUES LEOPARD 2A4

Como una forma de evitar sesgos por parte del investigador y lograr mayores fundamentos de los aportes de un simulador de estas características, se solicitó la opinión de los comandantes de los Grupos Blindados con material Leopard 2A4 y del Secretario de Estudios de la Escuela de Caballería Blindada, algunas de las cuales se presentan en la Figura N° 7, donde también se destacan los aspectos más generales de un “Simulador de Contexto”,¹⁷ para lo cual se tomó como base lo que se presenta en el libro *Simulation Training: Fundamentals and Applications*, específicamente, lo referido al punto sobre

¹⁷ “Un simulador de contexto permite integrar tres niveles de simulación; “SIMULADOR” lo que la tripulación debe hacer dentro del tanque; “SITUACIÓN SIMULADA” condición de contexto de terreno y situaciones tácticas a las que será sometido el pelotón; “SIMULADOR DE CONTEXTO” es el entorno de lección, tiene relación con la capacidad de medir resultados y presentarlos” (Fauquet y Nane, 2016, p. 3).



“Three levels of analysis of simulations”.¹⁸ Cabe destacar que incorporar estas opiniones conforma parte de las herramientas propias de la metodología cualitativa, denominada como triangulación de datos (Benavides y Gómez, 2005).¹⁹ Por ello, una vez aprobado el proyecto, estas opiniones se unirán con otras herramientas con la finalidad de ampliar la perspectiva del fenómeno estudiado y fortalecer los resultados.

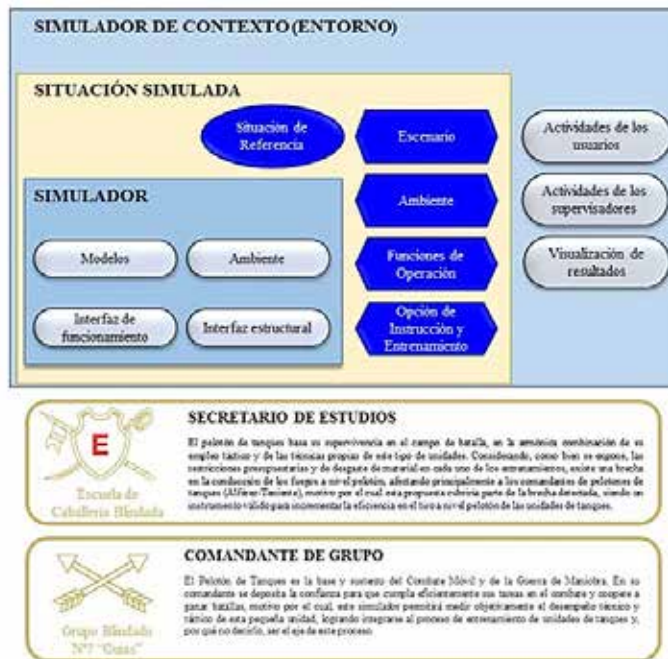


Figura N° 7: “Opinión de personal que tienen directa relación con la formación y el entrenamiento de estas competencias”.

Fuente: elaboración propia.

10. CONCLUSIONES

El desarrollo de este simulador podrá dar respuesta a una necesidad real de la Fuerza Terrestre, al cubrir una brecha de capacidad existente, la que hasta la fecha no es realizada por ningún otro sistema. Lo anterior está fundamentado con las opiniones de los oficiales referenciados anteriormente y que tienen injerencia en la formación, doctrina, entrenamiento y mando de estas unidades, con el objetivo de incrementar su capacidad de combate.

18 Traducción del autor.

19 “La triangulación comprende el uso de varias estrategias al estudiar un mismo fenómeno, por ejemplo, el uso de varios métodos (entrevistas individuales, grupos focales o talleres investigativos)”.



Desde el punto de vista técnico, la solución propuesta se vuelve viable, ya que se cuenta con el tiempo, los recursos necesarios y la tecnología existente, al aprovechar el *hardware* y *software* disponible en el mercado, diseñar la integración, interfaces, arquitectura y desarrollo de lecciones, evitar perder tiempo y esfuerzo y centrar todo el trabajo en el objetivo final de la investigación, el que corresponde a dotar a la Institución de un simulador de nivel pelotón, que permita incrementar su capacidad de instrucción y entrenamiento, en un período no superior a tres años desde el inicio del proyecto. Cabe destacar que el fin de este proyecto es proporcionarle a los comandantes métodos ágiles y una mejora continua, comprendiendo que el trabajo con los usuarios finales y una investigación más profunda, permitirán alcanzar mayores prestaciones.

Se definió como guía de este trabajo que el entrenamiento debe ser lo más cercano a la realidad y generar un nivel de estrés acorde a las exigencias de las unidades. Por este motivo, el sistema incorporará los terrenos de empleo, material de países vecinos acorde a la posibilidad, sistemas de comunicaciones integrado, para medir empíricamente la capacidad de conducción, sumado a un puesto de mando y control con la funcionalidad de degradar unidades, enfrentando a los pelotones a la sucesión de mando.

Finalmente, este sistema podrá ir incrementando nuevas capacidades al contar con recursos y personal de apoyo, siendo fundamental para el éxito de este trabajo, su incorporación dentro de los sistemas de simulación institucionales y la asignación de recursos para su mantenimiento, actualización y reparación.

BIBLIOGRAFÍA

- Benavides, M. y Gómez, C. (2005). Métodos en investigación cualitativa: triangulación. *Revista Colombiana de Siquiatría*, volumen (34), n. 1, 118-124. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S003474502005000100008&lng=en&tlng=es.
- Ejército de Chile (2012). *MDO-60303: Manual de tanque y pelotón de tanque*. Santiago, Chile: División Doctrina.
- Ejército de Chile (2014). *MDO-60304: Manual de entrenamiento de tanque y pelotón de tanque*. Santiago, Chile: División Doctrina.
- Ejército de Chile (2014). *MDO-80302: Manual de tiro de tanques*. Santiago, Chile: División Doctrina.



Fundación Repsol (2018). *Fundación Repsol, energía social*. Recuperado de: www.fundacionrepsol.com.

Fauquet, P. y Name, A. (2016). *Simulation training: fundamentals and applications*. Berna, Suiza: Springer International Publishing.

Lasa, C., Álvarez, A. y Heras, R. (2017). *Métodos ágiles: scrum, kanban, lean*. Madrid, España: Grupo Anaya S.A.

Moliner, M. (1990). *Diccionario del uso del español*. Madrid, España: Gredos.

Pressman, R. (2010). *Ingeniería del software: un enfoque práctico*. 7ª edición. Ciudad de México, México: Mcgraw-Hill Companies.

Real Academia Española (2018). *Real Academia Española*. Recuperado de: www.rae.es

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

EROSIÓN COSTERA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

SR. JUAN CARLOS PASTENE

SR. ALEXANDER SIEGMUND



EROSIÓN COSTERA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO,* CHILE

Sr. Juan Carlos Pastene¹

Sr. Alexander Siegmund²

Resumen: *la erosión costera es un proceso natural y constante que ha contribuido a la formación de las actuales líneas de costa a nivel mundial. Sin embargo, hoy en día este proceso se intensifica, debido al cambio climático global. El aumento del nivel del mar ha sido considerado la mayor amenaza para los asentamientos humanos emplazados en la costa. La Región del Biobío se caracteriza por una fuerte concentración de población y actividades económicas a lo largo del eje costero. La costa regional está expuesta constantemente a procesos erosivos, los que deben abordarse con medidas estructurales y no estructurales. A partir de la caracterización de los accidentes geográficos costeros de la Región del Biobío, el objetivo del presente artículo es demostrar la necesidad de establecer políticas públicas preventivas para la adaptación a la erosión costera y al cambio climático.*

Palabras clave: *costa, erosión costera, cambio climático, aumento del nivel del mar, adaptación.*

Abstract: *coastal erosion is a natural and continual process that has contributed to the formation of current coastlines worldwide. However, today this process is intensified due to global climate change. The rising sea level has been regarded as the greatest threat to coastal human settlements. The Biobío Region is characterized by a high concentration of population and economic activities along the coastal area. The regional coast, due to its geographical location, it is constantly exposed to erosive processes which must be addressed with structural and non-structural measures. From the characterization of the Biobío Region's geographic coastals accidents, the purpose of the present article is to*

* Para efectos de esta revisión crítica la Región del Biobío corresponde a la unidad político-administrativa previa al 6 de septiembre de 2018.

1 Geógrafo M.Sc. Heidelberg University of Education & Heidelberg University, juan.pastene@uniheidelberg.de

2 Prof. Dr. Heidelberg University of Education & Heidelberg University.



show the need to establish preventive public policies for adaptation to erosion and climate change.

Keywords: *coast, coastal erosion, climate change, sea level rise, adaptation.*

1. INTRODUCCIÓN

La zona costera se asocia a cambios continuos que siempre han existido y que han configurado un “área ambiental compleja de gran importancia para la sociedad. No obstante, esta área establece restricciones y riesgos para el hombre y sus construcciones” (Strahler A.N. & Strahler A.H., 1994, p. 330). A este respecto, “la tendencia a considerar la zona costera como una zona estática y estable a lo largo del tiempo ha conducido a desestimar su fragilidad” (D’Amico, 2009, p. 171), lo que ha provocado que, desde mediados del siglo XX, aumente el impacto de las actividades humanas diariamente, producto del desarrollo económico y la explotación de la costa (Cai, Su, Liu, Li & Lei, 2009).

Las áreas costeras son espacios de intensa urbanización y donde coexisten actividades económicas de diversa naturaleza que proporcionan condiciones específicas factibles para ser valoradas por la sociedad como recurso. Actualmente, alrededor del “40% de la población mundial vive a menos de 60km de la costa, cifra que se eleva al 60% en América Latina y el Caribe” (PNUMA, 2000, 2004, en D’Amico, 2009, p. 171).

La costa es un área dinámica donde la erosión tiene lugar constantemente. Esto incluye la pérdida o el desplazamiento de tierra a lo largo del litoral, donde las causas involucran procesos naturales y antropogénicos (O’Neill Jr., 1985). Actualmente “las consecuencias de la erosión costera se han vuelto cada vez más desastrosas, debido al crecimiento de la población, edificios, transporte y la infraestructura de servicios públicos que residen a lo largo de la costa”.(Luther, 2013, p. 3). Además la erosión costera se ve incrementada con las condiciones actuales del cambio climático global, poniendo en peligro la capacidad a largo plazo de las áreas costeras para adaptarse, particularmente, con la mayor frecuencia de huracanes, tormentas e inundaciones (Cai et al., 2009).

Estudios realizados por el IPCC (2007) consideran que el número anual de víctimas producto de la erosión actual y las inundaciones costeras alcanzará los 158.000 habitantes en 2020 y más de la mitad de los humedales eventualmente desaparecerán, debido al aumento del nivel del mar. Consecuentemente “los severos problemas de erosión costera observados durante el siglo XX se exacerbarán en el siglo XXI bajo escenarios plausibles de calentamiento global” (Zhang, Douglas & Leatherman, 2004, p. 41).



2. ÁREA DE ESTUDIO

La Región del Biobío se localiza entre los 36°00' y 38°29' de latitud sur y entre los 70°59' de longitud oeste y el océano Pacífico, en el centro sur de Chile, y se caracteriza por una fuerte concentración de población en la zona costera continental, interviniendo más de 500 km de costa continental e insular. Actualmente más del 50% de la población regional vive en las 15 comunas que constituyen el área costera. Aquí también se inserta la segunda aglomeración urbana más poblada de Chile, el Área Metropolitana de Concepción, el polo de desarrollo más importante de la Región (Figura N° 1 a).

Esta área corresponde a una costa de colisión originada por la subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana, cercana y paralela a la gran fosa chileno-peruana, caracterizada por la frecuencia y magnitud de fuertes terremotos y, generalmente, por una alta energía de las olas que golpean la costa (CONA, 2010).

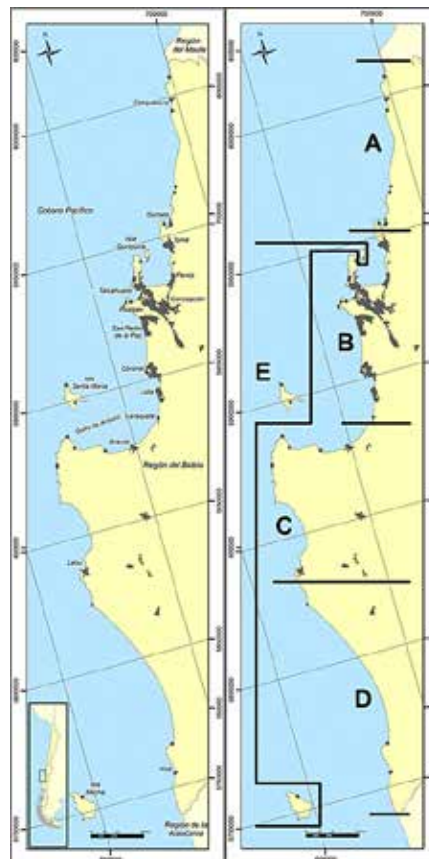


Figura N° 1: (a) Asentamientos urbanos y (b) zonificación morfológica propuesta por Mardones *et al.* (2001).

Fuente: elaboración propia.



Mardones, Hernández, Cristo, Sánchez, Carrasco, Millán & Peña (2001) sugieren una zonificación de la franja costera de acuerdo con su homogeneidad morfológica resultante de la interacción de procesos tectónicos, litológicos, fluviales y marinos, a partir de lo cual proponen cinco unidades principales (Figura N° 1 b): (A) franja recta del sector norte de Dichato, (B) costa de bahías cerradas entre Coliumo y Laraquete, (C) plataforma costera de Arauco, (D) llanura costera del sector sur de Lebu y (E) los sistemas naturales insulares.

Las condiciones climáticas de la franja costera se caracterizan por la transición en dirección norte-sur entre las condiciones del dominio mediterráneo y las del dominio templado húmedo, produciendo abundancia de lluvia durante el invierno y un verano seco. Además en dirección oeste-este se registra un fuerte gradiente de lluvia producto del efecto de choque de vientos húmedos con la Cordillera de la Costa.

3. LA AMENAZA DE LA EROSIÓN COSTERA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

El desarrollo en áreas costeras ha tenido un impacto importante en la dinámica del entorno natural. Sin embargo, las variables naturales también afectan su estado morfodinámico, generando riesgos, ya que “los sistemas geomorfológicos costeros están constantemente expuestos a la erosión y la deposición a medida que se adaptan a los cambios ambientales” (O’Connor, Lymbery, Cooper, Gault & McKenna, 2009, p. 923).

Tal como indica la Comisión Europea:³ “la erosión costera es un proceso natural que siempre ha existido y que ha dado forma a las costas a lo largo de la historia, pero ahora está claro que su dimensión está lejos de ser la natural” (European Commission, 2005, p. 3). A pesar de que existen múltiples precedentes de intentos de revertir esta situación, la erosión antropogénica puede contribuir a comprometer a largo plazo la capacidad de las áreas costeras para adaptarse a los impactos del cambio climático global, particularmente por el aumento del nivel del mar y el aumento de la severidad y frecuencia de los temporales (Figura N° 2).

El potencial aumento del nivel del mar asociado a los cambios climáticos ha sido considerado la mayor amenaza para las ciudades ubicadas en islas o regiones costeras, “fuera del problema evidente de la pérdida de territorio, hay problemas de intrusión salina y contaminación de recursos hídricos con agua de mar” (Cifuentes & Meza, 2008, p. 9).

3 www.ec.europa.eu



Erosión costera y cambio climático en la Región del Biobío, Chile

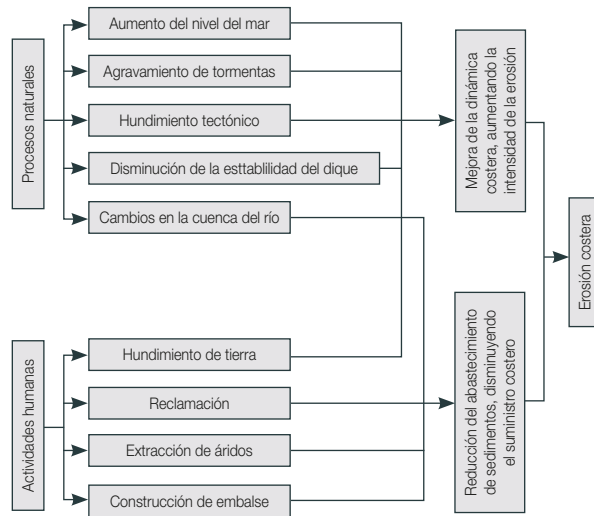


Figura N° 2: “Principales causas de la erosión costera”.

Fuente: Modificado de Cai *et al.*, 2009, p. 417.

La erosión costera en el contexto del cambio climático global es un problema que tiene dimensiones múltiples y tiene un alto nivel de complejidad (Figura N° 3). Considerando esto, “tempranamente los gobiernos e investigadores comenzaron a hablar de adaptación, que si bien no es la única vía de acción, probablemente sea la más razonable en términos de la alta probabilidad de sufrir un cambio en las condiciones del clima” (Cifuentes & Meza, 2008, p. 10).

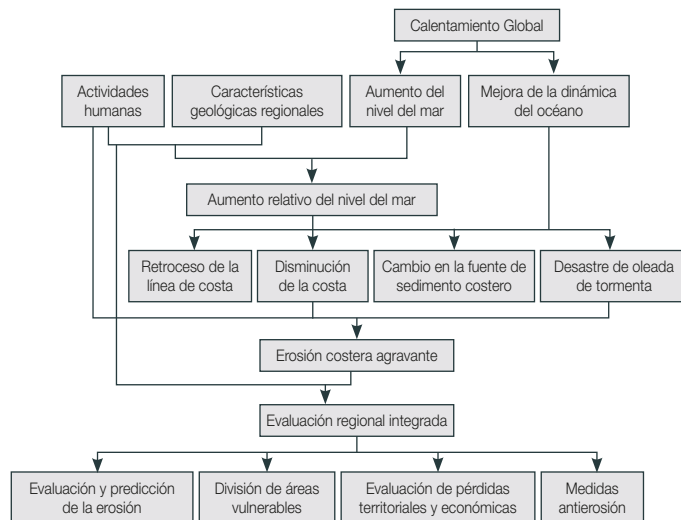


Figura N° 3: “Efectos del cambio climático en la erosión costera y su evaluación y prevención”.

Fuente: Modificado de Cai *et al.*, 2009, p. 419.



A diferencia de la naturaleza, donde la adaptación solo es reactiva, las sociedades pueden desarrollar estrategias de anticipación y reacción utilizando la información disponible y la vulnerabilidad de los sectores expuestos, ajustando sus sistemas ecológicos, sociales y económicos (IPCC, 2001).

Existen dos tipos de medidas de adaptación para controlar la erosión costera: estructurales y no estructurales. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático-Subgrupo de Gestión de la Zona Costera (IPCC-CZMS, 1990) sugirió que las tecnologías óptimas en respuesta al aumento del nivel del mar, que posiblemente estarán asociadas a la respuesta frente a la erosión costera, se pueden clasificar en tres enfoques de adaptación: protección, acomodamiento y retiro (planificado) (Figura N° 4 a).

Por otro lado, las medidas no estructurales incluyen educación geográfica y simulacros de emergencia (Figura N° 4 b), además de “controles de uso del suelo, el establecimiento de líneas de advertencia como línea de base costera y líneas de control de construcciones costeras para proteger la costa de edificaciones inapropiadas y prohibición de la extracción de áridos y reclamaciones” (Cai et al., 2009, p. 422).

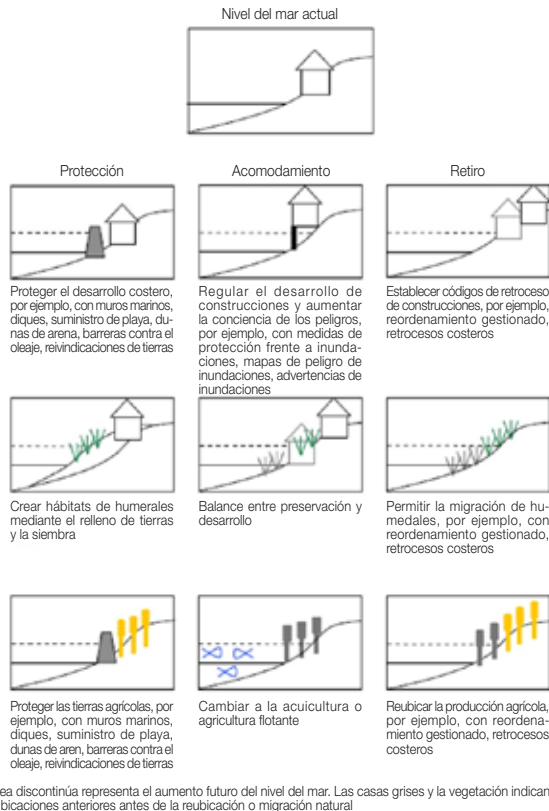




Figura N° 4: a) Enfoques de adaptación al aumento del nivel del mar (Fuente: Modificado de Linham & Nicholls, 2010, p. 13) y (b) Simulacro de tsunami para los establecimientos educacionales costeros de la Región del Biobío. Fuente: BioBio Chile, 2016.

3.1. Procesos de erosión costera y efectos del cambio climático en la costa de la Región del Biobío

La investigación realizada por Araya-Vergara (1982) describió la Región dentro del “sector de erosión con estabilidad promedio”, relacionada con costas de afloramientos sedimentarios terciarios relativamente blandos, destacando la presencia de acantilados que prácticamente ya no retroceden por acción marina, sufriendo variaciones espacio-temporales de poca relevancia en el registro histórico documentado.

Las características tectónicas de la costa regional, ubicadas en el margen de la zona de subducción interplaca, ocasionan cambios morfológicos constantes, los que son prácticamente indetectables. No obstante, los eventos sísmicos y tsunamis repentinos que afectan a la costa han generado un levantamiento y hundimiento del terreno, erosionando significativamente la morfología de la costa. El último evento sísmico del 27 de febrero de 2010 (27/F) generó una gran área de levantamiento cosísmico, que ha tendido a volver a su condición inicial. El alzamiento cosísmico provocó un descenso aparente del nivel del mar y, posteriormente, este ha vuelto a aumentar (Quezada, Jaque, Belmonte, Fernández, Vásquez y Martínez, 2010). Consecuentemente, la gran erosión costera causada por el tsunami es de alto grado y generó pérdida de biomasa en lugares como Llico y Tubul en Arauco y Escuadrón en Coronel (Martínez, C. en Abello, 2013) (Figura N° 5).



Figura N° 5: “Costa de (a) Llico, (b) Tubul y (c) Escuadrón”.

Fuente: archivo del autor, 2014.

Estudios realizados por Quezada *et al.* (2010) muestran que el hundimiento cosísmico provocó cambios en el perfil de *talweg* de los principales ríos de la Región, los que se movieron momentáneamente aguas arriba hacia el este, produciendo un transporte de sedimentos negativo de los sistemas fluviales hacia las costas. Otro impacto del hundimiento cosísmico registrado en la Región se detectó durante la temporada de lluvias, al producir inundaciones fluviales, principalmente en la desembocadura, debido a la altura más baja del terreno.

La influencia tectónica en la Región ha sido significativa en la formación de un sistema costero, denominado por Araya-Vergara (1981) como una “región de costas con grandes bahías de regularización con protección estructural”. El área está influenciada por bloques tectónicos diferenciales asociados a los fenómenos río-mar y ciclos marinos durante el Cuaternario, que, actualmente, generan un nivel ocupado por humedales, paleodunas y paleocostas, ambientes fuertemente intervenidos, principalmente por crecimiento urbano. Bajo estas condiciones, la confrontación de los cambios climáticos y, de forma específica, el aumento en el nivel del mar, es clave para los fenómenos de subsidencia costera asociados con la alta actividad tectónica de la zona. Todos estos factores pueden magnificar el impacto, generando cambios drásticos en la morfología costera y en los asentamientos humanos localizados en la costa.

Chile cumple con los criterios firmados por la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (artículo 4, N° 8), de los países considerados particularmente vulnerables (UNFCCC, 1992), identificándolo como un territorio con un extenso litoral de baja altitud, zonas áridas, zonas semiáridas, bosques y áreas propensas a la descomposición del bosque, tendiente a desastres naturales, áreas proclives a la sequía y la desertificación, áreas urbanas con problemas de contaminación del aire y áreas de frágiles ecosistemas montañosos en la Cordillera de la Costa y los Andes.



El Cuarto Informe de Evaluación del IPCC “Cambio Climático 2007: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad” (2007), mencionó varios impactos presentes y futuros en la zona costera de Chile asociados con el cambio climático global, entre los que debemos destacar las variaciones en el nivel del mar, el aumento de las tormentas y la disminución de la precipitación, una variable que influye en el suministro de sedimentos a la costa de las cuencas hidrográficas exorreicas.

El primer “Plan Nacional de Acción sobre Cambio Climático 2008-2012” (PANCC) (CONAMA, 2008), indicó que la población asentada en la zona costera del golfo de Arauco y, particularmente, el caso de caleta Las Peñas, la ciudad de Arauco y caleta Tubul presentan una alta vulnerabilidad a un aumento del nivel del mar, el que causaría una amenaza potencial en el suministro de agua y el saneamiento en las ciudades costeras y la contaminación de los acuíferos subterráneos por la intrusión salina en el territorio costero.

Según IPCC (2013) el nivel del mar regional cambiará, debido a modificaciones en la dinámica de la circulación oceánica, cambios en el contenido de calor del océano, redistribución masiva en todo el sistema de la Tierra y cambios en la presión atmosférica. En algunas localidades costeras de la Región del Biobío, los cambios en el ciclo hidrológico, subsidencia del terreno asociada a actividad antropogénica, procesos tectónicos y procesos costeros pueden dominar el cambio relativo del nivel del mar.

Debido a la incertidumbre de los efectos de la erosión costera en la Región, es imperativo implementar medidas de gestión apropiadas para adaptarse a los efectos negativos que puede tener en la zona. “La amenaza del aumento del nivel del mar a escala local requiere de dos acciones complementarias: un mayor entendimiento del problema y la identificación e implementación de apropiadas medidas de adaptación” (Vides, Sierra-Correa & Cortes, 2012, p. 14). Aunque la estimación del aumento del nivel del mar puede considerarse pequeña, “0,19 m en todo el mundo entre 1901 y 2010” (IPCC, 2013). Los mismos impactos son significativos en términos de erosión, esto significa que será necesaria la adaptación del área costera para hacer frente al aumento actual y futuro del nivel del mar (Vides, 2008).

3.2. Gestión de los espacios costeros frente a la erosión y cambio climático en la Región del Biobío

La erosión costera se puede contextualizar dentro de los riesgos que afectan a la zona costera. En Chile, la evaluación de los riesgos naturales que afectan el área costera se incluye en los instrumentos de planificación territorial. Sin embargo, no existe una sistematización de las mejores metodologías de evaluación y la zonificación del riesgo.



Las unidades territoriales referidas en la planificación territorial, generalmente, consideran unidades administrativas que no son representativas del impacto de los fenómenos costeros que interactúan en una zona, sin considerar las características locales que influyen en los diferentes comportamientos de los procesos y las posibles estrategias de adaptación que pueden llevarse a cabo.

En la Región del Biobío se han tomado algunas medidas de mitigación y adaptación para evitar que la erosión afecte la morfología costera y, por lo tanto, no afecte la infraestructura. Cabe destacar que estas intervenciones aumentaron después del terremoto y tsunami del 27/F.

La protección de la infraestructura es la más extendida en la Región, con terraplenes a lo largo de la costa, que detienen las olas que golpean en tiempos de tormenta o mitigan la fuerza del agua en eventos tsunamigénicos. En las ciudades de Talcahuano, Dichato, Lebu y caleta Coliumo, por ejemplo, también desempeñan el papel de costanera, mejorando el atractivo turístico de la zona. Sin embargo, al considerar la fuerza de los procesos costeros, la construcción de esta infraestructura cumple parcialmente la función para la cual fue construida e, incluso, puede generar un efecto adverso en la costa.

En las últimas décadas, el asentamiento de viviendas cercanas a la costa se ha popularizado en algunos sectores de la Región. En el sector occidental de Isla Mocha, algunas casas aprovecharon el extenso sistema dunario para su localización. En la localidad de Punta Lavapié, hay algunas casas cerca de la costa, construcciones elevadas improvisadas, que han logrado evitar las mareas altas y el aumento del nivel del mar durante los períodos de tormenta. Luego del terremoto y tsunami del 27/F, esta opción tipo palafito se extendió a varias localidades afectadas. Algunas viviendas de las localidades de Dichato y caleta Tumbes fueron las primeras en implementar medidas de acomodación de viviendas, inicialmente diseñadas para enfrentar un tsunami, representando un buen precedente para este tipo de acciones, debido a la buena acogida de la población local y su efectividad para enfrentar los procesos costeros en tiempos de tormenta. Sin embargo, su efectividad contra un tsunami aún no se ha probado en toda su magnitud.

El retiro planificado de la infraestructura localizada más próxima a la costa hacia terrenos más seguros no ha sido parte de la política aplicada a las áreas costeras bajo amenaza. Si bien esta opción ha sido propuesta en algunas caletas, principalmente después del terremoto y el tsunami del 27/F, la idea no ha resultado fructífera, debido al rechazo de la población local.

Finalmente, la implementación de medidas no estructurales se ha llevado a cabo principalmente en el entorno cotidiano, dando cuenta de la realidad de vivir en un área



antrópica compleja e integradora, con procesos físicos y bióticos. Sin embargo, las medidas que apuntan a mostrar la implicancia de los procesos costeros en el día a día han aumentado paulatinamente durante los últimos años. La Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) ha proveído a la población local de educación geográfica y cívica en contexto de desastres. Adicionalmente, se ha producido un aumento cuantitativo y cualitativo de los estudios de riesgos costeros en los instrumentos de planificación territorial.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el informe “Estado del Medio Ambiente en Chile 2012”, publicado por el Instituto de Asuntos Públicos (IAP, 2012) de la Universidad de Chile, se sugiere que en Chile haya más preocupación sobre las políticas de adaptación, cuyos efectos serán a largo plazo. No obstante, esto también se puede lograr considerando políticas de corto y mediano plazo. Se hace necesario la realización de estudios específicos para hacer que las unidades de análisis y la aplicación de políticas sean mucho más precisas y detalladas que en la actualidad. En este contexto, “aunque los proyectos de ingeniería están orientados a solucionar los problemas de erosión, se ha demostrado que estos proyectos también pueden crear problemas en otros lugares cercanos” (Van Rijn, 2011, p. 867).

Pastene (2014) plantea la importancia de la actividad tectónica que afecta las costas de la Región del Biobío al momento de enfrentar estrategias frente a la erosión costera, procesos que se manifiestan mediante terremotos y sus consecuentes tsunamis, generando cambios constantes y, a veces, bruscos en la morfología y la infraestructura costera, por lo que un estudio exhaustivo de ellos es clave para incorporar su dinámica en las herramientas de planificación, lo que permitirá y apoyará la toma de decisiones.

Apoyando la caracterización a través de los accidentes geográficos costeros expuestos en este artículo, Andrade, Arenas y Lagos (2010) sugieren que entre las muchas variables del entorno natural que deberían incluirse en las actividades relacionadas con los instrumentos de planificación territorial y que pueden aplicarse a las estrategias de adaptación está la geomorfología, suponiendo que el estado de morfoconservación de los accidentes geográficos no solo refleja la evolución del medio, sino que también es una expresión de cómo ha sido la decisión sobre las modalidades de la ocupación espacial.

Actualmente es un hecho que el empeoramiento de la erosión costera ha sido causado por el aumento del nivel del mar y la frecuencia e imprevisibilidad de las tormentas asociadas con el cambio climático (European Commission, 2005). “La tendencia del calentamiento global es difícil de revertir y parece que el cambio climático global no estará bajo control en un futuro cercano” (Cai et al., 2009, p. 416). Por lo tanto, el gobierno y



las instituciones de investigación deberían centrarse en los procesos que interactúan en la dinámica costera y en el desarrollo de estrategias de adaptación óptimas para cada unidad de análisis. En situaciones extremas como esta, la costa puede desaparecer por completo, razón por la cual se debe reconsiderar su mantenimiento artificial.

El cambio climático global es una amenaza que “presenta múltiples dimensiones y tiene un nivel de complejidad bastante alto. La incertidumbre, multifactorialidad, dinámica y estrecho vínculo con los caminos de desarrollo desafían nuestra habilidad de resolverlo” (Cifuentes & Meza, 2008, p. 10).

La geografía de nuestro país comprende una serie de condiciones para la ocupación del territorio que, combinado con la vulnerabilidad de gran parte de la población que vive en zonas de riesgo costero, aumenta los niveles de vulnerabilidad de la infraestructura, actividades económicas y, en general, la vida de las personas.

En la zona costera de la Región del Biobío, se debe enfrentar el fenómeno de la erosión costera a través de estrategias de adaptación estructurales (proteger, acomodar y retirar) y no estructurales. La consideración de los escenarios expuestos anteriormente, junto con las características de la costa regional, debería reflejarse en los instrumentos de planificación territorial, asumiendo estrategias preventivas para adaptarse a la erosión costera, considerando la dinámica de los procesos que la generan, en contraste con una visión reactiva que ha prevalecido hasta hoy. Las estrategias para abordar la erosión costera actual y futura deberían conducir a largo plazo al desarrollo sostenible de la zona costera en el contexto de su gestión integrada.

Dada la naturaleza transversal de las estrategias de adaptación a la erosión costera y el cambio climático y su relación con las políticas públicas es necesario, para su ejecución y funcionamiento, la participación de todos los diferentes actores de la sociedad. El Estado debe ser el responsable de generar escenarios para la construcción e implementación de políticas públicas para la adaptación a la erosión costera y el cambio climático con la generación de beneficios compartidos para las partes interesadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abello, C. (2013). Estudio afirma la existencia de errores en construcción tras el 27/F. *Diario Concepción*, 8-9.
- Andrade, B., Arenas, F. y Lagos, M. (2010). Incorporación de criterios de fragilidad ambiental y riesgo en la planificación territorial de la costa de Chile central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45, 5-20. DOI: 10.4067/S0718-34022010000100001



- Araya-Vergara, J. (1981). El concepto de delta en ría y su significado en la evolución litoral (ejemplo de Chile Central). *Revista Informaciones Geográficas de Chile*, 28, 19-42.
- Araya-Vergara, J. (1982). Análisis de la localización de los procesos y formas predominantes de la línea litoral de Chile: observación preliminar. *Revista Informaciones Geográficas de Chile*, 29, 35-55. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/117968/Analisis-de-la-localizacion-de-los-procesos-y-formas-predominantes.pdf?sequence=1>
- BioBío Chile (2016). *Convocan a simulacro de tsunami para establecimientos educacionales costeros del Bío Bío*. Santiago, Chile: Biobío Chile. Recuperado de: <https://www.biobiochile.cl/noticias/2016/04/20/convocan-a-simulacro-de-tsunami-para-establecimientos-educacionales-costeros-del-bio-bio.shtml>
- Cai, F.; Su, X.; Liu, J.; Li, B. y Lei, G. (2009). Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Progress in Natural Science*, 19(4), 415-426. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.05.034
- Cifuentes, L. y Meza, F. (2008). Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile. *Temas de la Agenda Pública*, 19, 1-19. Recuperado de https://cambioglobal.uc.cl/images/publicacionesextension/1_2008_Cambio_Climatico_Consecuencias_Desafios.pdf
- CONA (2010). *Geología Marina de Chile*. Recuperado de: http://www.cona.cl/publicaciones/geologia_marina/revista.html
- CONAMA (2008). *Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2008-2012*. Recuperado de: <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/11/Plan-Accion-Nacional-CC-2008-2012-PANCC.pdf>
- D'amico, G. (2009). Fragilidad de los espacios litorales: lineamientos para comprender la erosión costera inducida en el litoral marítimo bonaerense. El caso de la localidad de Mar del Tuyú. *Revista Geograficando*, 5(5), 169-186. Recuperado de: http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/art_revistas/pr.4448/pr.4448.pdf
- European Commission (2005). *Living with Coastal Erosion in Europe. Sediment and Space for Sustainability. Results from the EUROSION Study*. Recuperado de: http://www.euroasion.org/project/euroasion_en.pdf
- IAP (2012). *Informe País Estado del Medio Ambiente en Chile 2012*. Recuperado de: <http://www.inap.uchile.cl/publicaciones/106526/estado-de-medio-ambiente-en-chile-2012>.



IPCC (2001). *Summary for Policymakers: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/wg2TARsummaries.pdf>.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf

IPCC-CZMS (1990). *Strategies for Adaptation to Sea Level Rise*. Recuperado de: http://papers.risingsea.net/federal_reports/IPCC-1990-adaption-to-sea-level-rise.pdf

Linham, M. y Nicholls, R. (2010). *Technologies for Climate Change Adaptation-Coastal Erosion and Flooding*-. Recuperado de: <http://www.tech-action.org/>

Luther, M. (2013). *Coastal Erosion in Daniel's Harbour*. Trabajo presentado en PT-13: Coastal and Ocean Engineering ENGI.8751 Undergraduate Student Forum, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University, St.John's, NL, Canada. Recuperado de: <http://journals.library.mun.ca/ojs/index.php/prototype/article/download/490/545>

Mardones, M., Hernández, H., Cristo, O., Sánchez, A., Carrasco, P., Millán, J. y Peña, L. (2001). *Geografía de la VIII Región del Biobío. Colección Geografía de Chile*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar (IGM).

O'connor, M., Lymbery, G., Cooper, J., Gault, J. y Mckenna, J. (2009). Practice versus policy-led coastal defence management. *Marine Policy*, 33(6), 923-929. DOI: 10.1016/j.marpol.2009.03.007

O'neill Jr., C. (1985). *A Guide to Coastal Erosion Processes*. Recuperado de: <https://seagrant.sunysb.edu/glcoastal/pdfs/guidetoerosionprocesses.pdf>

Pastene, J.C. (2014). *Coastal Erosion in the Biobío Region, Chile-Adaptation Strategies and Future Scenarios of Climate Change*. (Master Thesis for the Degree Master of Science Governance of Risks and Resources). Heidelberg University, Heidelberg, Alemania.

Quezada, J., Jaque, E., Belmonte, A., Fernández, A., Vásquez, D. y Martínez, C. (2010). Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante



el terremoto Mw=8,8 del 27 de Febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur*, 2, 11-44. Recuperado de: http://www.revgeosur.udec.cl/wp-content/uploads/2016/08/revgeosur_N2_quezada.pdf

Strahler, A. N. y Strahler, A. H. (1994). *Geografía Física*. Barcelona, España: Editorial Omega.

UNFCCC (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Recuperado de: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Van Rijn, L. (2011). Coastal erosion and control. *Journal Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867-887. DOI:10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004

Vides, M. (2008). *Adaptación costera al ascenso del nivel del mar*. Recuperado de: <https://docplayer.es/219830-Adaptacion-costera-al-ascenso-del-nivel-del-mar-insumos-al-documento-segunda-comunicacion-nacional-de-colombia.html>

Vides, M., Sierra-Correa, P. y Cortes, L. (2012). *Gestión costera como respuesta al ascenso del nivel del mar. Guía para administradores de la zona costera del Caribe*. Recuperado de: [https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/venezuela-amp-colombia/Vides-et-al.-2012.--Coastal-Management-in-Response-to-Sea-Level-Rise.--\[ESP\].pdf](https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/venezuela-amp-colombia/Vides-et-al.-2012.--Coastal-Management-in-Response-to-Sea-Level-Rise.--[ESP].pdf)

Zhang, K., Douglas, B. y Leatherman, S. (2004). Global Warming and Coastal Erosion. *Climatic Change Journal*, 64(1), 41-58. DOI: 10.1023/B:CLIM.0000024690.32682.48

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

BLOCKCHAIN Y SU APLICACIÓN EN CIBERDEFENSA

SG2. ROBERTO SOTO YANCA



BLOCKCHAIN Y SU APLICACIÓN EN CIBERDEFENSA

SG2. Roberto Soto Yanca¹

Resumen: *blockchain forma parte y sustenta el mecanismo de funcionamiento detrás de las llamadas “criptomonedas”, siendo estas últimas una de las muchas aplicaciones de esta tecnología. El funcionamiento y la particularidad de la blockchain radica en el concepto de descentralización y en la distribución entre sus nodos (computadores participantes que entran voluntariamente a cadenas de bloques abiertas o a las cerradas, por invitación). Otra característica destacable es su sistema de cifrado o codificación, dada la inmutabilidad de los registros y su trazabilidad o seguimiento. En el sector de la defensa, esta tecnología podría ser vista como una solución al control de cadenas de suministros, amenazas a la ciberseguridad, comunicaciones e, incluso, en obtener autorización para la activación de un sistema de armas. En el presente artículo serán analizados diversos sectores de la industria a nivel mundial que están utilizando esta tecnología con la intención de presentar de manera resumida el uso de blockchain.*

Palabras clave: *blockchain, descentralización, nodo, cifrado, ciberdefensa, peer to peer.*

Abstract: *blockchain is part of and the sustenance of the “cryptocurrencies” operation mechanism, one of the many applications of this technology. The operation and the particularity of the blockchain lies in the concept of decentralization and in the distribution between the nodes (participating computers that enter voluntary to the open chains or to the closed ones through and invitation). Another outstanding feature is its encryption or coding system, due to the immutability of the records and their traceability or monitoring. In the defense sector, this technology could be seen as a solution for the supply chains control, the threats against cybersecurity, communications, and even to obtain authorization to activate the weapons system. In this article,*

¹ Mecánico de Equipos de Telecomunicaciones. Técnico Nivel Superior en Ciberdefensa (ACAPOMIL). Profesor Militar de Escuela (Seguridad Militar).



will be analyzed several worldwide sectors of the industry that are using this technology with the intention of presenting a summarized way the blockchain use.

Keywords: *blockchain, decentralization, node, encryption, cyberdefense, peer to peer.*

1. INTRODUCCIÓN

Es necesario aclarar previamente que lo innovador de esta tecnología y su incipiente uso en la industria a nivel mundial, implica que la literatura disponible sobre *blockchain* y temas relacionados sea escasa, por lo que se debió acudir a bibliografía digital.

Cuando en mayo de 2008 se produjo la erupción del volcán Chaitén, el fenómeno terminó por arrasarse con la mitad de la ciudad, producto del daño colateral, principalmente ocasionado por un aluvión y posterior desbordamiento de los cursos de agua cercanos. Al día siguiente, el gobierno debió realizar una costosa y peligrosa operación para recuperar la bóveda del Conservador de Bienes Raíces del pueblo, porque, de no ser posible rescatarla, se perderían todos los títulos de dominio de la zona.

Más recientemente, en enero de 2019, se registró un incendio intencional que destruyó el Juzgado de Letras de Rapa Nui, además de una notaría y otros edificios, en el marco de una manifestación por la muerte de un isleño. Las llamas fueron provocadas por un grupo de personas que intentaron atacar al agresor durante la audiencia de formalización que se realizaba en el lugar. En los dos edificios, se encontraba documentación e información importante, la que se perdió producto de las llamas.

En ambos casos, resulta relevante la opinión de Julio Pertuzé,² Jefe de la División de Economía del Futuro del Ministerio de Economía, en una entrevista a Emol.com, donde a raíz de lo ocurrido en Chaitén, indica que: “toda esa información, que era crítica y valiosa, estaba centralizada en un solo lugar. Era vulnerable [...] algo que con la tecnología *blockchain*, jamás habría ocurrido” (Pertuzé, 2018).

² Julio Pertuzé es Ingeniero Civil de Industrias de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), con Ph.D. en Ingeniería de Sistemas y M.Sc. en Tecnología y Políticas Públicas del Massachusetts Institute of Technology. Desde el 2013 es profesor del Departamento de Ingeniería Industrial de la PUC y Codirector del Magíster de Innovación UC. Sus principales áreas de investigación son la Gestión Estratégica y las Políticas Públicas de Ciencia, Tecnología y Educación Superior.



2. **BLOCKCHAIN**

Blockchain, traducido como “cadena de bloques”, es considerada la revolución industrial de Internet, o el siguiente paso a ella, ya que se pasa de la etapa de una ‘Internet de la información’ a una de ‘Internet del *valor*’ (Preukschat, 2017),³ dado que como actualmente en Internet es posible distribuir de forma libre información sin intermediarios, con *blockchain* se puede hacer algo similar, pero con activos. También conocido como la “Internet de la confianza”, *blockchain* permite transferir activos digitalizados entre los usuarios, a diferencia de la Internet clásica que solo permite enviar información o copias de activos. La propia red actúa como un “ministro de fe”, manteniendo un acuerdo sobre la existencia, estado y la evolución de los elementos compartidos. O desde un punto de vista técnico, este sistema, basado en la confianza y el consenso, está construido a partir de una red de computadores que gestionan una gigantesca base de datos.

Es una tecnología perteneciente al ámbito de las DLT (Distributed Ledger Technologies) traducido como “Tecnologías de Registro Distribuido”. Esto, debido a que la información que se encuentra en *blockchain* se encuentra disponible públicamente. Es descentralizada, lo que significa que no se encuentra en un solo servidor, de tal manera que todas las transacciones son visibles para todo el mundo.

Para entender su funcionamiento, es necesario conocer, al menos, los elementos básicos que la conforman. El primero corresponde a los nodos, que son los equipos informáticos de la red que sostienen la cadena y que, al mismo tiempo, almacenan los registros tal como un libro mayor de contabilidad, por lo tanto, conforman su infraestructura.

El segundo elemento es la red, conformada por todos los nodos, los que son iguales entre sí. Esto se traduce en una red entre pares o P2P (peer to peer).

Un tercer elemento se refiere al protocolo, con el cual se crea el procedimiento de registro. Con este se alcanza un acuerdo entre los nodos sobre la versión válida de dicho registro. Esto asegura que exista solo una versión inmodificable y auditable de los datos almacenados y de los movimientos o transacciones realizadas.

3 Alex Preukschat es el autor de la primera novela gráfica de Bitcoin del mundo (BitcoinComic.org), el best seller de *Blockchain*, LibroBlockchain.com, coordinador de *Blockchain* España (BlockchainEspana.com), Alianza *Blockchain* Iberoamerica (AlianzaBlockchain.org) y de la Identidad Autónoma y Comunidad para la identidad digital descentralizada SSIMeetup.org. Es creador de juegos móviles de criptomoneda con MoneyFunGames.com.



Otro elemento son las cadenas de bloques, que se asemeja a un libro de contabilidad digital donde se anotan todas las transacciones que suceden en la red, agrupadas en bloques que continuamente son enlazados linealmente entre sí, donde el primer bloque se enlaza con el segundo, el segundo con el tercero y así sucesivamente (de allí el nombre de “cadena de bloques”).

Las *wallets* o “billeteras digitales”, por su parte, corresponden a las aplicaciones o interfaces en las que los usuarios hacen sus transacciones y gestionan su identidad digital (ID). Son operables mediante el uso de una clave privada y una clave pública.

Finalmente, existe un subgrupo de los nodos llamados “mineros”, especialmente en las redes de criptomonedas y que corresponden a computadores que ponen a su disposición su capacidad de procesamiento, para realizar el trabajo de validación que autoriza que se añadan nuevos bloques a la cadena. Para esto, deben resolver un problema matemático, siguiendo un protocolo de consenso criptográfico de enorme y deliberada complejidad (Cabrera, 2018).⁴

3. FUNCIONAMIENTO DE *BLOCKCHAIN*

Como muestra la Figura N° 1, el funcionamiento de una transacción común de *blockchain* comienza de la siguiente forma:

3.1 Envío

El usuario “A” realiza el envío de un activo digital desde una *wallet* o billetera digital hacia otro usuario identificado como “B”. Lo que ocurre en este punto es en realidad el envío de una versión *hash* (resumen cifrado o criptográfico) de lo que se conoce como Clave Pública. La clave pública de “B” es conocida por todos en la red y, en este caso, es utilizada por “A” para cifrar el mensaje.

3.2 Validación

La transacción es examinada y autorizada por distintos nodos y, posteriormente, agrupada con otras transacciones.

4 Fabiola Cabrera V. es Magíster en Asuntos Públicos del Instituto de Ciencias Políticas de París y Magíster en Gestión e Ingeniero Comercial, por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Actualmente dicta el curso de Globalización e Innovación para Ingeniería Industrial PUCV.



3.3 Minería

Las transacciones son tomadas por los mineros como un trabajo para resolver a cambio de una retribución (criptomonedas). Ellos eligen un grupo de transacciones, que puede ser diferente para cada agrupación de mineros y compiten por conseguir un “valor” (nonce), el que obtienen resolviendo un problema matemático, que autoriza al minero que lo resolvió a proponer su bloque con las transacciones que contiene y, luego, ser agregado a la cadena de bloques. El bloque contiene, además, la identificación y *hash* (resumen criptográfico) del bloque anterior, estableciéndose la linealidad de la cadena.

3.4 Distribución

Todas las cadenas de bloques se guardan en los computadores que forman parte de la red, por lo que no existe una base de datos única que pueda ser atacada. Un potencial atacante debería tener el control de, a lo menos, un 51% de la red para intentar conseguir su objetivo. A diferencia de las bases de datos centralizadas, *blockchain* crea una base de datos descentralizada, distribuida, compartida y replicada.

3.5 Recepción

El usuario “B” recibe el mensaje proveniente desde “A”. Lo que ocurre en este punto es que “B” toma el *hash* recibido y utiliza su clave privada (la cual solo él conoce) para descifrar el mensaje.



Figura N° 1: “Funcionamiento de *Blockchain*”.

Fuente: BBVA, 2018.



4. SISTEMA DE ENCRIPCIÓN

Gracias a la criptografía⁵ y al mecanismo detrás de *blockchain*, la adulteración de los datos se hace casi imposible. De esta manera, se asocia a *blockchain* con la confiabilidad, disponibilidad e integridad de la información.

Por ende, el sistema de encriptación es fundamental en esta tecnología. En 1976, Whitfield Diffie y Martin Hellman crearon el algoritmo del protocolo criptográfico que lleva sus nombres. Es un protocolo de establecimiento de claves entre partes que no han tenido contacto previo, utilizando un canal inseguro y de manera anónima. El sistema se basa en la idea de que dos interlocutores, pueden crear en conjunto una clave compartida sin que un extraño, que esté interceptando las comunicaciones, pueda llegar a obtenerla. Para ello propusieron dividir las claves encriptadas en dos claves: una pública y una privada (criptografía asimétrica).⁶ Con la clave pública se puede cifrar un mensaje, pero para descifrarlo es necesaria la clave privada. Estas claves (llamadas Keys en inglés), están formadas por grandes combinaciones de letras y números.

Para lo anterior, se elige un número público (clave pública) y un número secreto (clave privada). Usando una fórmula matemática, que incluye la exponenciación, cada interlocutor hace una serie de operaciones utilizando la clave pública y la clave privada.

La clave privada se usa para obtener la clave pública. Cada usuario tiene su clave privada, pero esta nunca debe ser compartida con otras personas. La clave privada es la más larga de las dos y se usa para generar una firma para cada mensaje que envía un usuario. Esta firma es usada para confirmar que la transacción ha sido realizada por ese usuario (principio de no repudio)⁷ y, además, prevenir que la transacción sea modificada por cualquier persona una vez que ya ha sido realizada. A continuación, ambas partes intercambian sus respectivas claves públicas. La clave pública se usa junto con la información en la red y una suma de comprobación, para transformarla en la dirección *hash* que otras personas pueden ver.

-
- 5 Criptografía es la ciencia y arte de escribir mensajes en forma cifrada o en código. Es parte de un campo de estudios que trata las comunicaciones secretas. A partir de la evolución de las computadoras, la criptografía fue ampliamente divulgada, empleada y modificada y se constituyó luego con algoritmos matemáticos.
 - 6 El sistema matemático que soporta a este principio de criptografía solo puede ir en una dirección; en consecuencia, aplicar cualquier intento por descifrar una clave con la otra es prácticamente imposible, es decir, que la clave pública (Public Key) existe porque existe la llave privada (Private Key), no de forma inversa.
 - 7 El no repudio es un servicio de seguridad que permite probar la ejecución de un proceso (transacción, comunicaciones, etc.). El no repudio en el origen: el emisor no puede negar que envió el mensaje, porque el destinatario tiene pruebas del envío; el no repudio en el destino: el receptor no puede negar que recibió el mensaje, porque el emisor tiene pruebas de la recepción.



La suma de comprobación o verificación es una parte de la información que sirve para detectar cambios accidentales en la secuencia de datos y, así, proteger la integridad de los mismos. En el caso de la clave pública, la suma de comprobación es necesaria para verificar que no haya sido alterada y, de esta forma, evitar problemas de recepción de la misma. El receptor termina recibiendo el mensaje que otra persona le envía a través de esta dirección.

Para entender de mejor manera su funcionamiento, la Figura N° 2 muestra una analogía de ejemplo del intercambio de un mensaje utilizando criptografía asimétrica, donde el usuario “A” quiere enviar un mensaje secreto que solo pueda ver el usuario “B”.

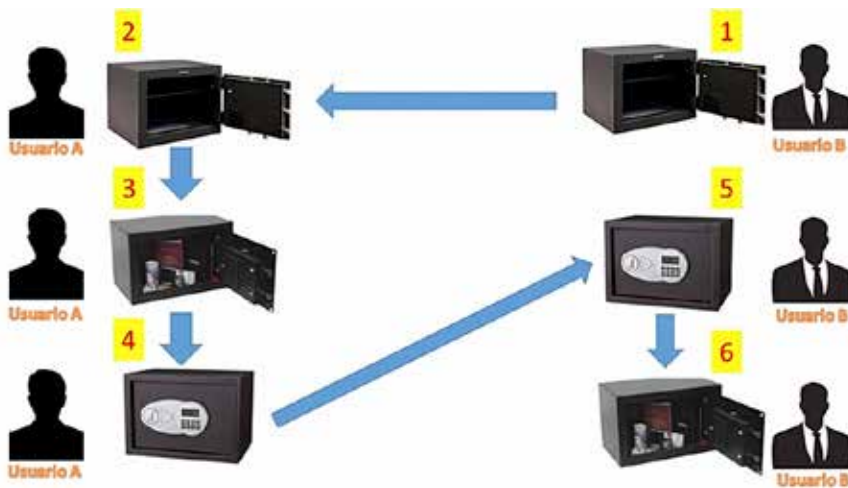


Figura N° 2: “Criptografía asimétrica”.

Fuente: elaboración propia.

En este ejemplo, la caja con la cerradura abierta es la “clave pública” del usuario “B”, y la clave que abre la cerradura es su “clave privada”. En primer lugar, debemos imaginar que el usuario “B” envía al usuario “A” una caja fuerte abierta, pero que cuenta con una cerradura electrónica. La cerradura se bloqueará una vez que el usuario “A” cierre la puerta de la caja y solo podrá abrirse con una clave, que únicamente el usuario “B” conoce. Luego de que el usuario “A” recibe la caja abierta, pone en ella lo que necesita enviar, cierra la caja fuerte usando su cerradura (ahora el usuario “A” ya no podrá abrir la caja) y, finalmente, envía la caja al usuario “B”, quien la abre, utilizando su clave privada.

En este punto es válido preguntarse: si alguien tiene una clave pública, ¿debe existir un método inverso para obtener la clave privada? En teoría, revertir esta función es un sextillón (10^{36}) de veces más difícil que la exponenciación usada para transformar los números. Esto implica que si quisiéramos hacer el mecanismo inverso, se requerirá del computador más poderoso del mundo, el cual, en teoría, tardaría más de 4 seguido de 31 ceros años



(4³¹), para completar el cálculo. El algoritmo hace fácil generar la clave pública a partir de la privada, pero es muy difícil o casi imposible en la actualidad hacer la operación inversa.

5. INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

Se hace necesario mencionar Internet de las cosas para hablar de futuras aplicaciones de *blockchain*. La Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es una red de objetos físicos (vehículos, máquinas, electrodomésticos, entre muchos otros) que utiliza sensores e interfaces de programación de aplicaciones (API) para conectarse e intercambiar datos por Internet (Sap, 2019).⁸ Todos estos dispositivos se interrelacionan y forman un sistema, que incluye, incluso, animales y personas, que se individualizan y se identifican dentro de la red, siendo capaces de transferir datos en ella, sin requerir de la intervención entre humanos o entre humanos y computadores. En la actualidad, desde un teléfono inteligente o una tablet, es posible configurar y administrar desde un solo lugar y, de manera eficiente, todos los equipos electrónicos y dispositivos que tengan conectividad en un hogar, como luces, cerraduras, alarmas, refrigeradores, aspiradoras, televisores e, incluso, lavadoras. Antonella Solari, gerente de productos móviles de Samsung Chile (Samsung, 2018),⁹ señala que: “con este tipo de innovaciones, podemos responder a las diversas necesidades de los usuarios como son el ahorro de tiempo, eficiencia de recursos y comodidad para administrar los diversos dispositivos al interior del hogar y, de esta forma, contribuir con la calidad de vida de las personas”. Los usuarios configuran los dispositivos para que funcionen de forma automática según sus necesidades y estos últimos, a su vez, entregan información a los propietarios de su estado. Con equipos que conocen todo lo relacionado sobre sus funciones, utilizando datos que recopilaban automáticamente, pueden rastrear y contar todo, reducir los desechos, las pérdidas y los costos. Los humanos sabríamos cuándo necesitamos reemplazar, reparar o eliminar cosas.

6. APLICACIÓN DE *BLOCKCHAIN*

Existen *blockchain* públicas y privadas y se diferencian porque las públicas pueden ser integradas por cualquier persona o entidad libremente (cumpliendo con requisitos

8 Fundada en 1972, SAP es el líder del mercado en *software* de aplicaciones empresariales, que ayuda a las empresas de todos los tamaños y en todas las industrias a funcionar de la mejor manera: el 77% de los ingresos de transacciones del mundo toca un sistema SAP. El aprendizaje automático, Internet de las cosas (IoT) y tecnologías avanzadas de análisis ayudan a convertir los negocios de los clientes en empresas inteligentes.

9 Samsung es el mayor grupo empresarial surcoreano. En 2012 se convirtió en el mayor fabricante mundial de telefonía móvil al superar a Nokia, que lideraba el mercado desde 1998. Fue reconocida por Booz & Co. y Boston Consulting Group, en 2013, como la segunda empresa más innovadora del mundo, por detrás de Volkswagen, luego de aumentar un 15% las partidas de I+D+i.



mínimos para su funcionamiento), mientras que en las privadas o cerradas, los nodos participantes deben ser invitados a integrar la red, como puede ser un grupo empresarial, una organización de gobierno, o en el caso de la defensa, una red de unidades militares. En las *blockchain* públicas, existe un sistema descentralizado en donde la información está distribuida por igual en todos los nodos, mientras que en las privadas, podría existir una jerarquía (Cabrera, 2018). A diferencia de las tradicionales bases de datos centralizadas que se alojan en un organismo central o en sus servidores, con el uso de *blockchain* es posible crear una base de datos distribuida, descentralizada, compartida y replicada. Los datos o transacciones registradas deben ser inalterables, controlables, poseer protección criptográfica y contar con un sistema de verificación de su autenticidad, tarea realizada por los nodos validadores. De esta forma, es posible el registro de las distintas transacciones en una base de datos descentralizada, facilitando el intercambio de información entre las partes de manera eficiente, abierta y verificable. Todos pueden ver lo que existe en la cadena y cualquier intento de alteración es descubierto de inmediato.

Blockchain aparece respaldado por su sistema criptográfico de clave pública y privada, como una solución a las graves vulnerabilidades que enfrenta Internet, con la posibilidad de aplicarla militarmente en temas de ciberseguridad, autorización y/o transmisión de órdenes, o algún tipo de mensaje en el caso de las comunicaciones, de manera indescifrable por terceros. Los *Smart Contracts* (contratos inteligentes) son un ejemplo de su aplicación: se trata de un protocolo informático o líneas de código programadas, que incorpora instrucciones para ejecutar un contrato de manera automática, siempre y cuando se cumplan las cláusulas preestablecidas. En el caso de un sistema de armas o de algún sistema de defensa, un *Smart Contract* podría activar un protocolo determinado de forma automática al cumplirse los escenarios previamente programados, sin la necesidad de la intervención humana, ya que no es necesario acudir a agentes externos para ejecutar la condición prevista, ni tampoco necesitan la intervención de personas para comprobar y ejecutar su cumplimiento.

La combinación del uso de la tecnología *blockchain*, la Internet de las cosas (IoT) e instrumentos como los *Smart Contracts*, permiten visualizar muchas posibilidades en distintos ámbitos de aplicación militar y que, actualmente, se están llevando a cabo por diferentes organismos en el mundo como a continuación se detallan.

6.1 Sistemas de seguridad y autorizaciones automáticas

En combinación con IoT, se pueden generar *Smart Contracts* que funcionen como autorizaciones inteligentes o una especie de cerradura digital, que solo les otorgue acceso o disponibilidad a los usuarios que sean autorizados.



Porsche, en colaboración con la empresa XAIN,¹⁰ se encuentra probando aplicaciones *blockchain* directamente en sus vehículos, con resultados satisfactorios. Las aplicaciones incluyen bloquear y desbloquear el vehículo para su uso, autorizaciones de acceso temporal al vehículo, así como la implementación de los denominados contratos inteligentes. Según Oliver Döring, de Porsche,¹¹ las operaciones basadas en *blockchain*, “son seguras y pueden procesarse mucho más rápido que cualquier otra solución anterior” y podrían abrir un novedoso camino hacia el desarrollo de la conducción autónoma. En palabras de Döring (2018):

Podemos usar *blockchain* para transferir datos de forma más rápida y segura, lo que brinda a nuestros clientes más tranquilidad en el futuro, ya sea que estén cargando su vehículo, estacionando o necesiten dar acceso temporal al coche a un tercero, como puede ser un agente de entrega de paquetes. Tomando 1,6 segundos, el proceso de abrir y cerrar el automóvil a través de una aplicación es hasta seis veces más rápido que antes. Además, tiene lugar un encriptado criptográfico eficiente. Este proceso asegura que todas las actividades estén documentadas en el *blockchain* de una manera que evite que se modifiquen y se puedan ver mediante una aplicación. Por ejemplo, las autorizaciones de acceso pueden distribuirse de forma digital y segura y pueden ser supervisadas por el propietario del vehículo en cualquier momento.

6.1.1 *Blockchain* en aplicaciones militares

En aplicaciones militares, el uso de *blockchain* aseguraría la protección de todas las comunicaciones entre los involucrados, permitiendo, además, un acuerdo colectivo utilizando los contratos inteligentes, en el que se puede conceder, por ejemplo, la autorización para el uso de un vehículo o el acceso a alguna instalación, activando los permisos cuando se cumplen condiciones previamente definidas.

La cadena de bloques es una base de datos que se encuentra compartida y distribuida y actúa como un libro de registros inalterable. Cada vez que se registra una

10 XAIN comenzó como un proyecto de investigación de la Universidad de Oxford en 2014 y se incorporó a Berlín en febrero de 2017. Con oficinas en Berlín, Stuttgart y Oxford, ofrece servicios en Europa, el Reino Unido y en todo el mundo. Dados los antecedentes de los fundadores y la experiencia en la industria automotriz, XAIN mantiene un fuerte enfoque de investigación y se especializa en brindar soluciones de infraestructura digital para el sector de la movilidad (<https://xain.io>).

11 Porsche AG es un fabricante de automóviles alemán especializado en automóviles deportivos lujosos, de alta gama, SUV y sedanes. Es propiedad del Grupo Volkswagen, que, a su vez, es propiedad mayoritaria de Porsche Automovil Holding SE.



autorización, esta se marca con un código único que la posiciona en el lugar secuencial que le corresponde.

En aplicación militar, lo anterior significa que las autoridades involucradas pueden usar sensores y dispositivos para recopilar datos sobre los vehículos, sistemas de armas o instalaciones. Esta información es ingresada a la *blockchain* y, en el caso concreto de un vehículo, puede incluir lecturas como niveles de combustible, estado operativo, así como su ubicación, para mantener un control si este se trasladara a plantas de revisión, talleres u otros puntos de la cadena de mantenimiento.

Las autoridades pueden determinar, mediante estos sensores, cuándo un vehículo está listo para ser empleado, lo que, a su vez, puede ser comunicado a los mandos directos y/o a otros involucrados. Además, al compartir distintos datos, un vehículo puede darle, a los que tomen decisiones, una noción sobre su disponibilidad, lo que ayudará a toda la cadena de mando a organizarse mejor y no tener que buscar soluciones de último minuto.

6.2 Gestión de identidades

Es uno de los ámbitos con mayor futuro en la actualidad, ya que las ID de *blockchain* en el futuro podrían reemplazar a las actuales credenciales (usuario y contraseña) y a la firma digital. Cada usuario guardará los datos que desee dentro de su identidad digital y dará acceso a quien estime conveniente de datos específicos para un fin determinado. Un ejemplo de esto, sería la posibilidad de garantizar los sistemas de voto electrónico, ya que cada usuario solo podrá votar una vez, lo que le entrega al registro electoral el acceso a sus datos para participar en el sufragio, refuerza los sistemas democráticos y participativos y los hace más eficientes.

Es lo ocurrido en marzo de 2018 en el país africano de Sierra Leona, donde se implementó tecnología *blockchain* en sus elecciones y, aunque solo fue parcialmente, alcanzó un 70% de los votos emitidos y se convirtió en un precedente para iniciativas a nivel mundial (Muñoz, 2018). La responsable tecnológica del proceso fue la empresa suiza Ágora.¹² Según declaraciones de Leonardo Gammar, de Ágora, *blockchain* permitió almacenar los votos de forma anónima y ofreció acceso en tiempo real a los resultados correspondientes de los votos emitidos por este sistema, para que cualquier parte interesada los revise, cuente y valide. En el

¹² Ágora es un ecosistema de votación basado en *blockchain*, que permite a cualquier persona votar en línea, desde un dispositivo digital de una manera totalmente segura, fácil y verídica (<https://www.agora.vote/about>).



ámbito militar, podría ser aplicado junto con el uso de *Smart Contracts*, para que se otorgue automáticamente la autorización, en el caso que se requiriera para el empleo de efectivos o medios militares, en escenarios y condiciones establecidos previamente, como es el caso de una situación de emergencia nacional.

6.3 Comunicaciones

En noviembre de 2018, Telefónica¹³ e IBM¹⁴ anunciaron un acuerdo de colaboración para optimizar procesos de negocio propios del sector telecomunicaciones a través del uso de *blockchain*. La colaboración se enfocará en aspectos clave del *blockchain* que ayudarán a solventar procesos complejos y habituales en la prestación de servicios, ya que monitorizará, en tiempo real, la veracidad y trazabilidad de cada llamada internacional y sus atributos (principalmente el origen, destino y duración de la misma), en una plataforma descentralizada a la que todos los operadores participantes en el enrutamiento tendrán acceso (Telefónica, 2018).

En cuanto a las comunicaciones militares, al contar con protocolos P2P de la *blockchain*, de llegar a producirse un ataque que interrumpa los canales de comunicaciones principales como Internet, enlaces inalámbricos o satelitales, se podrían enviar mensajes mediante canales alternativos de radiofrecuencia de uso militar (HF, VHF, UHF).

La red de *blockchain* podría ser distribuida a lo largo del territorio en distintas unidades militares que cuenten con la suficiente capacidad técnica para alojar servidores *blockchain*, de tal manera que existiría una copia local del libro mayor en caso de producirse interrupciones en la red, la cual, al estar distribuida, no tiene un punto central vulnerable. El Departamento de Defensa de Estados Unidos planteó que contar con un sistema de mensajes y transacciones seguro es una necesidad crítica, junto con la condición de que este debe ser accesible a través de un navegador *web* o una aplicación nativa. Para lo anterior, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa¹⁵ se encuentra en la búsqueda de soluciones

13 Telefónica S.A es una empresa multinacional española de telecomunicaciones, con sede central en Madrid, España, situada como la compañía de telecomunicaciones más importante de Europa y la quinta del mundo, con más de 346 millones de clientes.

14 Fundada en 1911, International Business Machines Corporation (IBM) (NYSE: IBM) es una reconocida empresa multinacional estadounidense de tecnología y consultoría con sede en Armonk, Nueva York. Fabrica y comercializa *hardware* y *software* para computadoras y ofrece servicios de infraestructura, alojamiento de Internet y consultoría en una amplia gama de áreas relacionadas con la informática, desde computadoras centrales hasta nanotecnología.

15 Conocida por su acrónimo DARPA o en su nombre original en inglés Defense Advanced Research Projects Agency, es una agencia del Departamento de Defensa de Estados Unidos responsable del desarrollo de nuevas tecnologías para uso militar.



que sean capaces de crear, transferir y recibir los mensajes utilizando una red de mensajería descentralizada (Darpa, 2018).

6.4 Autenticación de títulos

En el caso de instituciones que entregan títulos académicos o de formación, una vez que son registrados en la *blockchain*, estos quedan almacenados en la red y no pueden ser alterados o falsificados. Un ejemplo de esto, es el caso de Woolf University,¹⁶ donde 14 investigadores de Oxford crearon el primer centro del mundo basado en *blockchain*, en el que los computadores controlan cada movimiento de la vida académica. De esta manera, nadie puede falsificar las notas o los títulos. Todos los movimientos académicos del alumno y del profesor se registran en tiempo real en miles de computadores repartidos por el mundo.

En un informe de la Comisión Europea publicado en 2017, sobre la aplicación de *blockchain* en educación (Grech & Camillery, 2017), se destaca que la *blockchain* permitiría verificar automáticamente toda la experiencia de aprendizaje de una persona sin la necesidad de contactar a la institución que emitió el título. El estudio menciona como aportes de esta tecnología: el control de las calificaciones, la acreditación, los pagos, el registro de los movimientos de los estudiantes o la propiedad intelectual, entre otros. Además, se destaca la inmutabilidad de los registros y la imposibilidad de modificarlos. De esta manera, por parte de las instituciones se podría evitar que personas que no cuenten con los títulos exigidos o presenten certificados falsificados sean contratadas.

6.5 Seguimiento de productos y cadena de suministros

En un informe de Rabobank Research,¹⁷ titulado “*Blockchain: The Trigger for Disruption in the Food Value Chain*” (Rabobank, 2017), se plantea que para que las empresas logren tener éxito en la cadena de valor de los alimentos, deberían comenzar a explorar la forma de adquirir la tecnología *blockchain*, lo que se traduciría en reducir costos, aumentar la eficiencia y añadir aún más valor al trabajo.

16 <https://woolf.university>.

17 Rabobank (Coöperatieve Centrale Raiffeisen-Boerenleenbank B.A.) es una entidad financiera holandesa fundada en 1972 y de carácter multinacional. Proveedor mundial de servicios financieros para el sector de alimentos y negocios agrícolas, publica informes con estudios de las tendencias y desarrollos en la cadena alimentaria a nivel mundial.



Es el caso de Walmart,¹⁸ que ya ha implementado el *blockchain* en su funcionamiento, lo que le ha permitido saber en tiempo real de dónde viene un producto, cuáles fueron sus condiciones de producción, cuál es su estado en el trayecto y cómo fue entregado en el punto de venta. De esta forma, mejoraron la trazabilidad de sus alimentos y lograron transparentar la red de suministro de sus productos. Este campo es de gran interés, en general, para la logística militar y, en particular, en lo referido al suministro de componentes del equipamiento militar.

En agosto de 2018, el presidente de Estados Unidos, Donald Trump, convirtió en ley un proyecto de defensa por 716.000 millones de dólares, que autoriza el gasto militar e incluye menores controles en los contratos del gobierno con ZTE Corp de China y Huawei Technologies Co Ltd.

En un informe publicado por la reconocida Fundación para la Defensa de las Democracias,¹⁹ expertos de las agencias de inteligencia de Estados Unidos han dicho que les preocupa que ZTE, Huawei Technologies Co Ltd y algunas otras empresas chinas que estén en deuda con el gobierno chino, aumenten el riesgo de espionaje, debido a las posibles vulnerabilidades en las cadenas de suministro de equipamiento militar mediante la introducción de *hardware* malicioso, dado que en un posible escenario de conflicto, pueda verse alterado su correcto funcionamiento (Cummings, 2017). *Blockchain* sería la solución para esta vulnerabilidad, por su capacidad de seguimiento o trazabilidad, al establecer la procedencia de cada elemento utilizado en los sistemas (procesadores, circuitos o componentes). De esta forma, las instituciones de la defensa podrían gestionar de mejor forma la adquisición de componentes de los distintos proveedores, muchos de los cuales no cuentan con sistemas de control y seguridad que eviten futuros sabotajes. En consecuencia, cualquier cambio no autorizado en una cadena de suministros, por mínima que esta sea, sería detectada al instante evitando la incapacidad de no poder controlar los miles o millones de elementos que integran un sistema de armas moderno.

18 Wal-Mart, Inc. es una corporación multinacional de tiendas de origen estadounidense, que opera cadenas de grandes almacenes de descuento y clubes de almacenes. Es la mayor corporación pública del mundo, según la lista Fortune Global 500 de 2017. Cada semana, más de 275 millones de clientes y miembros visitan más de 11.300 tiendas en 58 banners en 27 países y sitios web de comercio electrónico en 10 países. Con ingresos en el año fiscal 2019 de \$ 514,4 mil millones, Walmart emplea a más de 2.2 millones de asociados en todo el mundo.

19 La Fundación para la Defensa de las Democracias (FDD) es un instituto de investigación, que se centra en la seguridad nacional y la política exterior de Estados Unidos. Según lo indica en su sitio web, realiza una investigación en profundidad, produce análisis precisos y oportunos, identifica actividades ilícitas y brinda opciones de políticas, todo con el objetivo de fortalecer la seguridad nacional y reducir o eliminar las amenazas planteadas por adversarios y enemigos de Estados Unidos y otras naciones libres.



6.6. Energía

En este ámbito, *blockchain* permitiría que usuarios del sistema eléctrico, que pudieran generar electricidad por medio de energías renovables dentro de sus propias instalaciones, vendan directamente sus excedentes sin intermediarios. La generación de energías limpias, como la energía solar y eólica de forma descentralizada, permite a quienes las generan no solo aprovecharlas para su propio consumo, sino que además aportan al sistema central, gestionando de mejor manera la información sobre los precios, los activos y los acuerdos entre todas las partes que participan de la cadena energética. Este es el caso de Chile, en donde la Comisión Nacional de Energía está aplicando esta tecnología para publicar información y estadísticas como los precios medios de mercado, los factores de emisión, los costos marginales y las instalaciones de generación residencial, entre otros (Cne, 2018). El aumento de la capacidad de cómputo en una institución está asociado a la adquisición de una mayor cantidad de equipos de red, servidores y equipos terminales, entre otros, lo que significa, al mismo tiempo, una gran cantidad de consumo de energía eléctrica, por lo que se hace necesario hacer más eficiente el uso de los recursos.

6.7. Prevención de delitos

Blockchain puede ser una solución a los problemas de corrupción y operaciones fraudulentas como son las licitaciones públicas, las cuales serían asignadas de forma automática a las empresas que hayan sido los mejores oferentes y no a aquellas cuyos funcionarios hayan ofrecido algún tipo de incentivo extraoficial, ya que, por medio de los *Smart Contracts*, se puede establecer un control en contra de la manipulación de políticas, desviación de presupuestos, reglas de procedimiento en el financiamiento y/o en la asignación de recursos, fechas de pago, emisión de documentación, entre otros, por parte de aquellos que se encuentran en posiciones de toma de decisiones y de quienes abusan de dicha posición.

7. LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

La tecnología *blockchain*, unida a otros conceptos como son IoT, inteligencia artificial, automatización, *big data*, realidad virtual, entre otros, dan paso a la nueva revolución digital. La cuarta revolución industrial o también llamada industria 4.0, es la era que sigue a los otros tres procesos cruciales precedentes. La primera revolución, entre 1760 y 1830, dio el paso de la producción manual a la mecanizada, gracias a la aparición, por ejemplo, del motor a vapor. La segunda, alrededor de 1850, trajo la electricidad y permitió la fabricación en serie. La tercera llegó a mediados del siglo XX, de la mano de la electrónica, las tecnologías de la información y de las telecomunicaciones. El cambio



que caracteriza a la cuarta revolución industrial es que los sistemas de producción estarán basados en tecnologías inteligentes que trabajarán unidas y en línea, a través de Internet, con un nivel en sus procesos de tanta precisión, velocidad y eficiencia, que generará en los países un aumento nunca antes visto en la producción, a un costo sumamente más bajo.

Como es de suponer, una evolución en lo que se refiere a lo tecnológico y la producción, genera nuevas incertidumbres a nivel mundial. La primera es la insuficiente capacidad de adaptarse por parte de los países a asumir los desafíos propios del progreso industrial, lo que proyecta desalentadoras consecuencias en lo económico, social y político, al estimarse que la automatización generara un alto nivel de cesantía. Por otro lado, se plantea que los países que logren adaptarse a estos cambios, tomen una posición estratégica de liderazgo frente a los países que no tengan el mismo éxito, ya que, los primeros, podrían concentrar la producción y la riqueza, generando una suerte de “darwinismo tecnológico”, donde aquellos que no se adapten no lograrán sobrevivir. Como consecuencia, es posible pensar que la industria orientada a desarrollar productos y servicios relacionados a la seguridad y la defensa centralizará sus esfuerzos en estrechar relaciones con los países que se levanten como potencias a nivel mundial, lo que implica nuevos desafíos para Chile en el ámbito de la defensa (Lodeiro, 2018).²⁰ Entre los desafíos más directos a enfrentar, está la desaparición de empleos por la sustitución de personas por robots en tareas administrativas, cadenas de montaje, entre otras. Por otro lado, los países sitúan sus prioridades con vista a la creación de empleos relacionados a la computación, lo que involucra un proceso educativo de capacitación y generar el capital humano calificado necesario para la nueva demanda de empleos.

El caso de Alemania es destacable, tal como muestra la Figura N° 3. Para la canciller alemana Angela Merkel, es una necesidad crear y aplicar la tecnología de punta y adoptar el sistema de educación dual de Alemania ²¹, con la finalidad de asegurar mano de obra cualificada, ya que en su calidad de primera economía del viejo continente, desea seguir liderando en Europa y, para ello, quiere alcanzar en un par de años la total digitalización de su industria, con el objetivo de incrementar y estabilizar el ritmo de crecimiento de su PIB.

20 Andrea Lodeiro E. es Periodista (ARCIS), Magíster en Ciencia Política, Seguridad y Defensa (ANEPE), Diplomada en Estudios Políticos y Estratégicos (ANEPE) y graduada de los cursos de Administración de Recursos de Defensa y Coordinación Interagencial y Contraterrorismo (CHDS).

21 En el sistema de formación dual alemán, se prepara a los egresados de los colegios para la futura vida laboral. La formación técnica dura entre dos y tres años y medio, según el oficio y la formación escolar previa y se realiza en forma dual en dos lugares de aprendizaje: la teoría se enseña en las escuelas vocacionales y, la práctica, en las empresas de formación.



Figura N° 3: Para Alemania la Revolución 4.0 es prioridad.

Fuente: Perasso, 2016.

8. CONCLUSIÓN

En la historia de la humanidad los avances tecnológicos son los responsables de acelerados y profundos cambios en lo económico y social. En la actualidad nos encontramos frente a una nueva revolución tecnológica, donde distintos tipos de desarrollo convergen y se unen para crear cosas inimaginables hasta hace unos años, incluso para los más visionarios. Los retos que nacen para los países a partir de esta revolución, generan distintos puntos de vista, tanto optimistas como pesimistas. Lo que está claro, es que para Chile son muchos los desafíos que debe enfrentar. No exento de dificultades, nuestro país ante esta nueva dimensión tecnológica debe potenciar su inversión en educación, investigación e innovación y desarrollo, lo que implica cambios en su modelo productivo, el impulso de nuevos esquemas de negocio, creación de nuevas industrias, entre otros. En palabras de Julio Pertuzé, “esta es una ola que viene y muy rápido (...) el primero que llega, termina ganando y nosotros queremos que el sector productivo chileno sea de los primeros que salga con estos nuevos usos (como la blockchain) a la conquista, no solo de Chile, sino que del mundo entero” (Pertuzé, 2018).

En este contexto, tecnologías como *blockchain* se convertirán en protagonistas de estos cambios radicales en los modelos de negocio y de gestión en las instituciones, al romper el paradigma de los modelos de gestión centralizados, transformando no solo la economía, la sociedad y las instituciones, sino que es importante considerar también cambios importantes en el sector defensa, donde las instituciones armadas



deben generar instancias para la inversión del desarrollo tecnológico y la investigación científica, aprovechando las oportunidades que aparecen a nivel tecnológico, para llegar potencialmente a convertirse en notables capacidades para sus funciones. No existen sistemas infalibles o que no sean vulnerables de alguna manera a ciberataques o al mal uso de estos, lo que puede dañar gravemente la imagen, la privacidad de los datos y la seguridad de las instituciones, razón por la cual se hace sumamente necesario buscar y poner en marcha soluciones como *blockchain*.

Es así como la presente revisión de distintos casos de uso de esta tecnología a nivel mundial, puede ser de interés para las instituciones encargadas de la defensa de Chile, con la finalidad conocer y, posteriormente, investigar sobre sus potencialidades y las posibles aplicaciones de *blockchain*, a través del seguimiento de los avances logrados en esta materia por otros países. Al mismo tiempo, puede servir como iniciativa para la creación de equipos de trabajo con expertos en la materia, con la intención de interactuar y recoger experiencias del desarrollo de aplicaciones en el ámbito civil y extrapolar su uso al ámbito de aplicación militar.

Finalmente, cabe destacar que la *blockchain* es una tecnología que dará mucho de qué hablar en los próximos años y que puede convertirse en un verdadero aporte a la solución de las vulnerabilidades existentes de muchos de los sistemas utilizados en la defensa. Así como los modelos de negocio y la gestión empresarial deberán adecuarse a los cambios venideros, la defensa también se verá en la obligación de romper el tradicional modelo de control centralizado y reemplazarlo por uno distribuido y descentralizado lógicamente y geográficamente.

BIBLIOGRAFÍA

24horas (30 de enero de 2019). Alcalde de Rapa Nui tras incendio en juzgado. “Era imposible razonar con los manifestantes, nos sobrepasó”. Recuperado de: <https://www.24horas.cl/nacional/alcalde-de-rapa-nui-tras-incendio-en-juzgado-era-imposible-razonar-con-los-manifestantes-nos-sobrepaso-3051738>

ABC Motor (27 de febrero de 2018). El móvil será la llave del Porsche del futuro. Recuperado de: www.abc.es/motor/reportajes/abci-movil-sera-llave-porsche-futuro-201802271212_noticia_amp.html.

BBVA (26 de abril de 2018). BBVA e Indra realizan el primer préstamo corporativo sobre tecnología ‘*blockchain*’ del mundo. Recuperado de: <https://www.bbva.com/es/bbva-indra-realizan-primer-prestamo-corporativo-tecnologia-blockchain-mundo/>



- Cabrera, F. (2018). Tecnología *Blockchain*: elementos básicos, aplicaciones y marcos regulatorios. (9 de mayo de 2018). Santiago, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Cne (5 de abril de 2018). Ministra Jiménez lanza tecnología *Blockchain* en datos del sector energético. Recuperado de: <https://www.cne.cl/prensa/prensa-2018/04-abril-2018/ministra-jimenez-lanza-tecnologia-blockchain-en-datos-del-sector-energetico/>
- Cummings, D. (11 de julio de 2017). FDD and CPRI Research *Blockchain* For Supply Chain Protection. Recuperado de: <https://www.ethnews.com/fdd-and-cpri-research-blockchain-for-supply-chain-protection>.
- Defense Advanced Research Projects Agency (2018). DARPA Defense Advanced Research Projects Agency, 1958-2018. Official website. Recuperado de: DARA-PA60_publication-no-ads.pdf
- Grech, A., y Camillery, A. (2017). *Blockchain in Education*. Luxembourg: Publications Office of The European Union. Recuperado de: [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC108255/jrc108255_blockchain_in_education\(1\).pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC108255/jrc108255_blockchain_in_education(1).pdf)
- Perasso, V. (12 de octubre de 2016). Qué es la cuarta revolución industrial (y por qué debería preocuparnos). Recuperado de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37631834>
- Pertuzé, J. (1 de agosto de 2018). La apuesta del Gobierno por el *blockchain* para que Chile no se quede abajo del carro de la Cuarta Revolución Industrial. (Entrevista de P. Marchetti). Recuperado de: <https://www.emol.com/noticias/Economia/2018/08/01/915332/La-apuesta-del-Gobierno-por-el-Blockchain-para-no-quedarse-abajo-del-carro-de-la-Cuarta-Revolucion-Industrial.html>.
- Preukschat, A. (2017). *Blockchain: La revolución industrial de internet*. Madrid, España: Grupo Planeta.
- Samsung (12 de Julio de 2018). El Internet de las Cosas aterriza en el hogar y promete hacer la vida más fácil. Recuperado de: <https://news.samsung.com/cl/el-internet-de-las-cosas-aterriza-en-el-hogar-y-promete-hacer-la-vida-mas-facil>
- SAP (26 de febrero de 2019). ¿Qué es Internet de las Cosas (IoT)? Recuperado de: <https://www.sap.com/latinamerica/trends/internet-of-things.html>



SMIT, H. (2017). *Blockchain: The Trigger for Disruption in the Food Value Chain*. Recuperado de: https://research.rabobank.com/far/en/sectors/farm-inputs/blockchain_the-trigger-for-disruption-in-the-food-value-chain.html

Telefónica (14 de noviembre de 2018). Telefónica e IBM colaboran para optimizar procesos del sector telco con *blockchain*. Recuperado de: <https://www.telefonica.com/es/web/sala-de-prensa/-/telefonica-e-ibm-colaboran-para-optimizar-procesos-del-sector-telco-con-blockchain>.

Workie, H. y Jain, K. (2017). Distributed ledger technology: implications of *blockchain* for the securities industry. En: *Journal of Securities Operations & Custody*, pp. 355-437. Washington, Estados Unidos: FINRA. Recuperado de: https://www.finra.org/sites/default/files/FINRA_Blockchain_Report.pdf.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MODIFICACIÓN DE LA
POSICIÓN DEL SELECTOR DE AUMENTO ÓPTICO DE
LA CÁMARA TÉRMICA DEL TANQUE LEOPARD 2A4**

MAY. JUAN ANDRÉS BEYER PEÑA



DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MODIFICACIÓN DE LA POSICIÓN DEL SELECTOR DE AUMENTO ÓPTICO DE LA CÁMARA TÉRMICA DEL TANQUE LEOPARD 2A4

MAY. Juan Andrés Beyer Peña¹

Resumen: este trabajo de investigación nace de la inquietud de buscar una forma innovadora y de bajo costo que aporte al empleo del sistema de control de fuego del tanque Leopard 2A4. De lo anterior, es que se definió optimizar, de la manera menos invasiva posible, la modificación de la posición del selector de aumento de la cámara térmica del tanque, a través de la metodología de ingeniería de sistemas, lo que permitirá que los cambios se realicen desde el mando del artillero, optimizando así su operación en tiempo, ergonomía y seguridad.

Palabras clave: tanque Leopard 2A4, sistema de control de fuego, cámara térmica, selector Klein/Gross, demostrador tecnológico.

Abstract: this research emerges from the need to look for an innovative and low cost solution to make a contribution to handle the Leopard 2A4 tank fire control system. Hence, to optimize, in the least invasive way possible, the modification of the raise selector position of the tank's thermal camera. Using the systems engineering methodology, changes will be made from the gunner command, optimizing its operation in time, ergonomics and security.

Keywords: Leopard 2A4 Tank, fire control system, thermal camera, Klein/Gross selector, technological demonstrator.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de armas² modernos se caracterizan por dar al comandante la posibilidad de emplear sus medios de forma rápida, oportuna y efectiva contra las unidades

1 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas Logísticos, mención Mantenimiento.

2 Sistema de armas: plataforma de combate móvil o estática, aérea o terrestre, que integra dos o más subsistemas de armas ofensivas (cañones, ametralladoras, lanzagranadas, misiles, cohetes u otros) o defensivas (lanzafumígenos, blindajes activos reactivos, sensores u otros) y los componentes necesarios para detectar, identificar y disparar los distintos proyectiles o artificios que incorpora.



opositoras, permitiéndole proyectar sus unidades en la totalidad del campo de batalla. En este sentido, el tanque constituye el sistema de armas de mayor relevancia en este escenario (Figura N° 1).



Figura N° 1: "Tanque Leopard 2A4".

Fuente: www.ejercito.cl/noticias

Es un sistema que integra, armónicamente, la capacidad de desplazarse por casi todo tipo de terreno con una protección blindada y potencia de fuego a gran distancia. Los tanques utilizan de manera eficiente sus capacidades en el combate móvil, a la mayor velocidad posible y lejos de su objetivo, a través del alcance máximo efectivo de su cañón, fortalezas que deben ser explotadas en toda oportunidad (División Doctrina, 2011, p. 15).³

Es en este contexto donde surge la necesidad de aumentar estas fortalezas, buscando una forma innovadora, eficiente y económica, que permita mejorar el desempeño del artillero del tanque en la localización de objetivos y en el tiro.

Por lo descrito anteriormente y, con posterioridad a un análisis sobre la base de ingeniería de sistemas, se decidió realizar un diseño conceptual destinado a optimizar la ergonomía del selector de aumento de la cámara térmica (Klein/Gross), que permita disminuir al mínimo los tiempos de búsqueda y adquisición de objetivos y entregar mayor comodidad al usuario, lo que influye, finalmente, en el tiro y en la efectividad del sistema de armas, tanto en el combate diurno como nocturno, a la vez que aminora sus limita-

3 Manual de Tanque y Pelotón de Tanque, CDO-60303.



ciones, como lo son, entre otras, la falta de cubierta y protección, debido a su volumen o, simplemente, el incorrecto aprovechamiento de esta. Por otra parte, mimetizar un tanque ante la óptica diurna es relativamente fácil, pero es tarea casi imposible ante la visión térmica, por lo que la rápida reacción del comandante y su tripulación frente a la detección o enfrentamiento con el adversario es imprescindible y solo segundos pueden marcar la diferencia entre dar de baja un objetivo o ser dado de baja.

2. SISTEMA DE ARMA

El sistema de armas en cuestión, como se mencionó anteriormente, es el tanque de combate Leopard 2A4 (Figura N° 2), vehículo de combate que destaca por sus características técnicas en 3 grandes grupos: poder de fuego, protección y movilidad (División Doctrina, 2009, p. 15).⁴

La potencia de fuego del tanque está íntimamente ligada a la implementación y características de sus equipos de observación y puntería (División Doctrina, 2014, p. 29).⁵ Es en estos equipos, pertenecientes al subsistema control de fuego, donde cobra relevancia el proyecto en comento, específicamente en el empleo del componente “cámara térmica”.



Figura N° 2: “Tanque Leopard 2A4.”

Fuente: www.ejercito.cl/noticias.

4 Manual de Operación del Tanque Leopard 2A4, CDO-70301.

5 Manual de Tiro de Tanque, MDO-80302.



3. SISTEMA DE CONTROL DE FUEGO

Al sistema de control de fuego (División Doctrina, 2014, pp. 37-39)⁶ pertenecen todos los subsistemas y aparatos necesarios para adquirir un objetivo (Figura N° 3), así como también los necesarios para dirigir el cañón y la ametralladora coaxial.

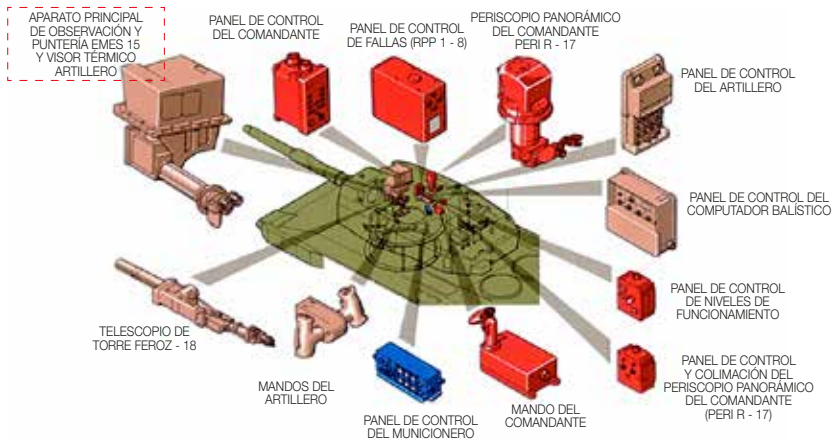


Figura N° 3: "Sistema control de fuego del tanque Leopard 2A4."

Fuente: CECOMBAC, Curso artillero, 2016.

Dentro de los principales aparatos del sistema, como ya se destacó anteriormente, el aparato de observación y puntería es el de interés para el proyecto, ya que este es el empleado por el artillero en forma permanente para identificar y apuntar sobre objetivos detenidos y/o en movimiento, colocando la cruz de visado del retículo de encuadramiento sobre estos (Figura N° 4).

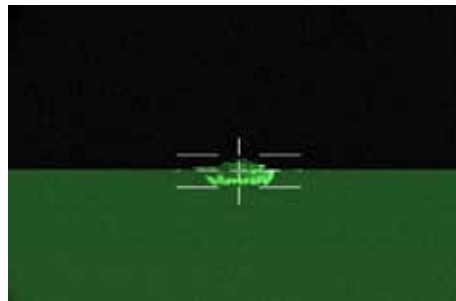


Figura N° 4: "Cruz de visado del tanque Leopard 2A4".

Fuente: CECOMBAC, Curso artillero, 2016.

6 Manual de Tiro de Tanque, MDO-80302.



La observación nocturna es efectuada por la cámara térmica, por medio de visores termográficos o térmicos, los que, en la actualidad, son los más perfeccionados y empleados que existen en materia de observación y puntería, ya que proporcionan imágenes de la zona de combate, al detectar y presentar la irradiación calórica propia de los objetivos que allí se encuentran.

3.1. Cámara Térmica

La cámara térmica que posee el tanque Leopard 2A4 chileno es el modelo WBG-X, la que pertenece a la primera generación de este tipo, fabricada y producida entre los años 1981 y 2000 por la empresa Airbus, Defence & Space (Figura N° 5).

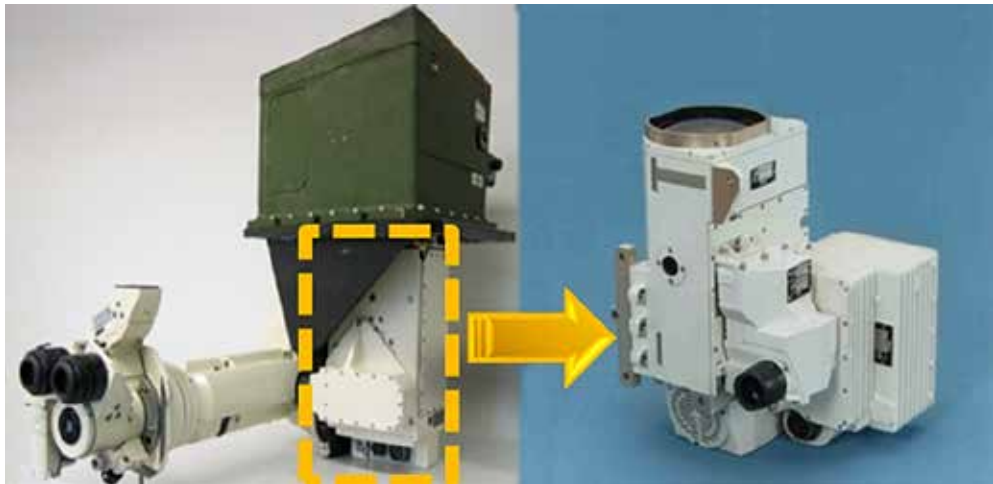


Figura N° 5: "WBG-X Tanque Leopard 2A4".

Fuente: Krauss, 2018.

Estos sistemas de visión se caracterizan y se diferencian por tres capacidades esenciales: la detección, el reconocimiento y la identificación.

Sin embargo, la empresa Airbus, Defence & Space, el año 2015, finalizó su soporte logístico, lo que ha influido directamente en el mantenimiento de sus capacidades y funcionamiento. Esto, debido a la producción de cámaras de tercera generación utilizadas por las nuevas versiones Leopard, como el 2A7, que posee la versión ATTICA.

Para el control de la cámara, el artillero dispone en su habitáculo del panel de control denominado "Unidad de Control del Tirador" (UCT), el que se encuentra instalado a la derecha, frente a su puesto (Figura N° 6).

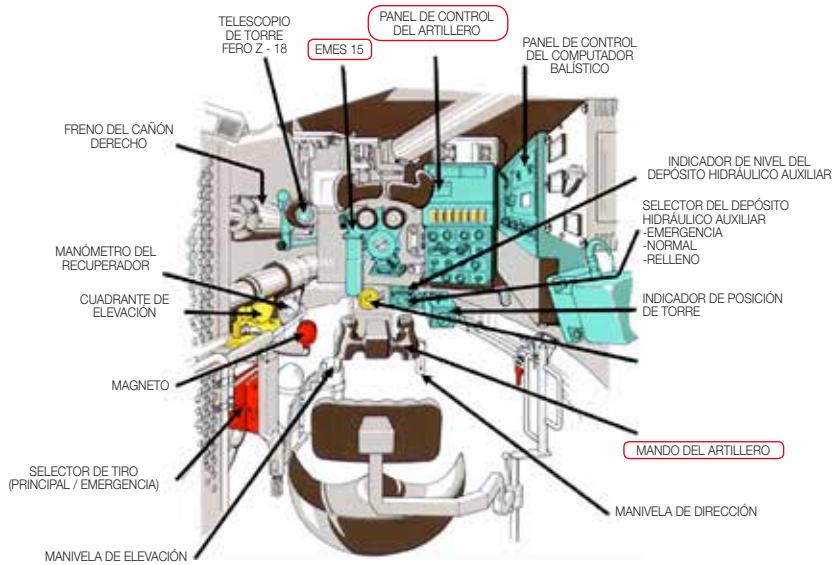


Figura N° 6: “Habitáculo del artillero del tanque Leopard 2A4”.

Fuente: CECOMBAC, Curso Artillero, 2016.

En este panel de control se encuentra el selector de aumento modo “grande o pequeño” (Klein/Gross), donde finalmente se centra esta investigación (División Doctrina, 2014, p. 241)⁷ (Figura N° 7).



Figura N° 7: “Unidad de Control del Tirador, Tanque Leopard 2A4”.

Fuente: elaboración propia.

7 Manual de Operación del Tanque Leopard 2A4, CDO-70301.



4. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD

Con los antecedentes adquiridos, se establece que la potencia de fuego del tanque está íntimamente ligada a la implementación y características de sus equipos de observación y puntería. Por otra parte, que en el combate moderno se hace indispensable que los sistemas de armas posean un nivel de respuesta cada vez más rápido en su empleo, como consecuencia de lo vertiginoso del combate moderno. Por ello, surge la necesidad de aportar, de forma innovadora, eficiente, económica y factible, para mejorar el desempeño del artillero tanto en el combate como en su entrenamiento, teniendo en consideración la serie de problemas de obsolescencia tecnológica de los componentes de su sistema de control de fuego. Lo anterior, sobre la base de la ingeniería de sistemas, en un tiempo de ejecución de 12 meses, durante el cual fue posible implementar la solución, comprobar y verificar su calidad.

En la fase inicial de búsqueda, fue de gran importancia contar con la experiencia de quienes están involucrados con el sistema de armas, específicamente, quienes lo utilizan, por lo que se identificaron a los *stakeholders*⁸ (Figura N° 8), donde destacan FAMAE (CMEOT), DIVEDUC, DIVDOC, COT (con sus grupos blindados), DIVMAN, ACAPOMIL y CECOMBAC,⁹ los que desde un inicio aportaron con su experiencia e interés en mejorar las capacidades de tan vital componente de la Fuerza Terrestre.



Figura N° 8: "Stakeholders".

Fuente: elaboración propia.

- 8 *Stakeholders*: cualquier persona, grupo de personas u organización que tenga una necesidad o espere algo del sistema, aquella que tenga influencia directa o indirecta sobre los requerimientos del sistema.
- 9 En el mismo orden: Fábricas y Maestranzas del Ejército; Centro de Mantenimiento Electrónico, Optrónico y Telecomunicaciones; División de Educación; División Doctrina; Comando de Operaciones Terrestres; División de Mantenimiento; Academia Politécnica Militar; Centro de Entrenamiento de Combate Acorazado.



En cuanto al funcionamiento, cabe destacar que el selector Klein/Gross (pequeño/grande) tiene la función de realizar el cambio de imagen de la cámara térmica (Figura N° 9), pasando, una vez detectado un posible objetivo, del campo de búsqueda *Gross* (grande), cuya característica principal es su mayor amplitud de visión del campo de batalla, al campo de visión *Klein* (pequeño), donde aparece la cruz de visado y se procede a reconocer e identificar el blanco para, finalmente, ejecutar el tiro.

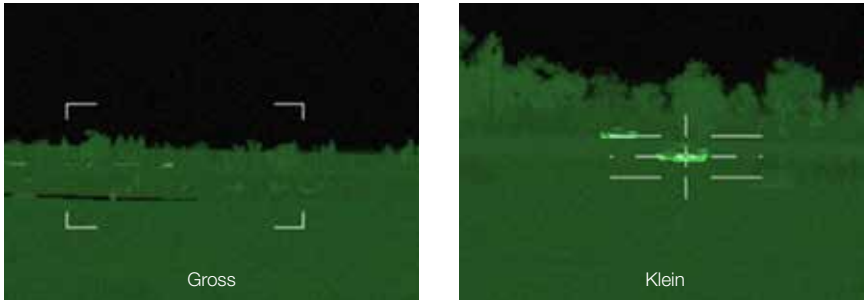


Figura N° 9: “Campo de visión Gross y Klein”.

Fuente: CECOMBAC, Curso Artillero, 2016.

Una vez identificados los *stakeholders*, se procedió a trabajar, específicamente, con los grupos blindados y el CECOMBAC, a quienes se les consultó, entre otras cosas, si este selector de imagen les generaba algún tipo de inconveniente por su ubicación y si consideraban que se podría optimizar su uso ubicándolo en otro lugar. Se obtuvo un total de 86 especialistas consultados (Figura N° 10), de los cuales un 76% cree que ubicar el selector en otro lugar del puesto del artillero sí optimizaría su empleo y que este lugar es el mando (78% de las opiniones; donde 11% corresponde a “binoculares de la cámara térmica”, 6% corresponde a “alcance de la mano cerca del mando” y 5% corresponde a “en los pies en forma de pedal”).

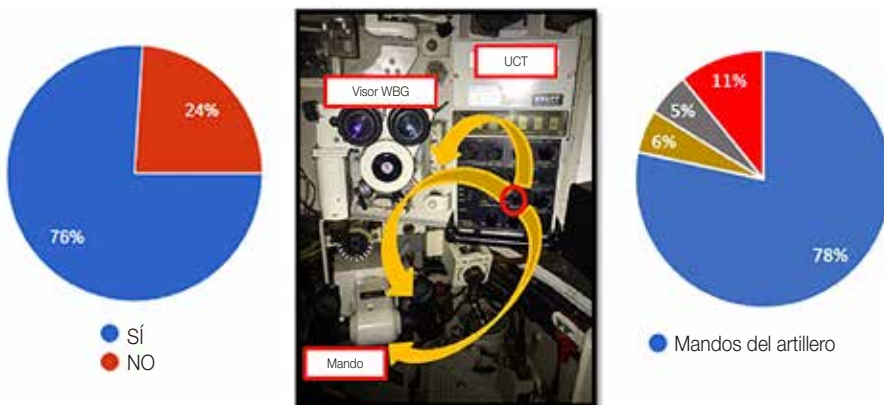


Figura N° 10: “Puesto del artillero y gráfica de respuestas de posible ubicación del selector”.

Fuente: elaboración propia.



5. ESTADO DE ARTE

Posteriormente, se indagó si en otros países se había efectuado algún tipo de modificación que se relacione con el tema en estudio, para lo cual se contactó al GDB (R) Roberto Ziegele Kerber, quien se encuentra encuadrado en la DIVDOC, donde ostenta el cargo de asesor de doctrina y encargado del grupo de desarrollo Leoben¹⁰ Chile. Recabando antecedentes de Leoben, se pudo constatar que en “Leoben Combat Developed Working Group Meeting”, reunión para los integrantes de Leoben realizada en la ciudad de Viena, Austria, entre el 14 y 18 de septiembre del año 2015, se expuso, entre otros temas, la situación actual del material de la familia Leopard (proyectos, investigaciones, etc.), donde destaca Suecia, país que presentó su proyecto referido a la mejora ergonómica en el switch de magnificación (Klein/Gross), para cambiar los canales de visión, en versiones del tanque Leopard 2A4 y 2A5 (Figura N° 11), con buenos resultados y gran aceptación por su personal, ya que ayudó a disminuir los errores de los artilleros en su utilización nocturna y aportó mayor rapidez en la ejecución del cambio de visión, entre otras mejoras.

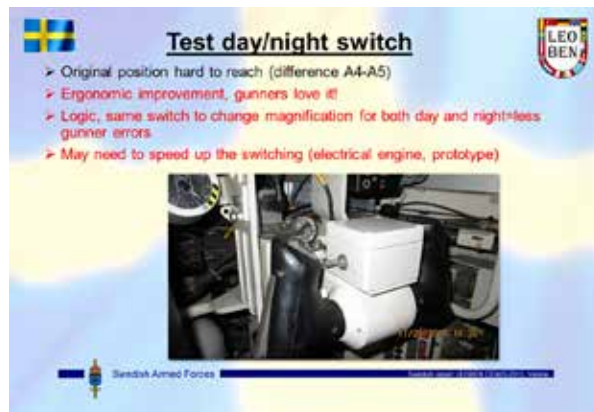


Figura N° 11: “Prueba día y noche del proyecto realizado por Suecia”.

Fuente: Leoben, 2015.

A pesar de que no se pudo acceder al proyecto (lo que habría facilitado el estudio), esta información confirmó la factibilidad de la ejecución y que su implementación sería de utilidad incluso si el tanque recibiera un *Up Grade* (actualización) de su sistema de control de fuego, referido al cambio de la cámara térmica por una de III generación, ya que, específicamente la UCT y los mandos no tienen modificaciones, tanto de componentes como de estructura, ergonomía y ubicación del selector Klein/Gross en las nuevas versiones Leopard.

10 LEOBEN: grupo que reúne a usuarios de tanques Leopard, compuesta por países como Alemania, Austria, Noruega, Dinamarca, Polonia, España, Portugal, Suecia, Finlandia, Canadá, Singapur y Chile.



6. EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Siguiendo con la ejecución del proyecto, se procedió a levantar los requerimientos operacionales (RO) del sistema, los que se definen como: “las necesidades o requerimientos del usuario, relacionados con la utilización del sistema y el cumplimiento de la misión”, en el Reglamento RAA 03008 “Proceso de Desarrollo de Capacidades Militares y de Administración del Ciclo de Vida”.

Luego los requerimientos fueron priorizados conforme al objetivo principal, que es diseñar conceptualmente una modificación de la ubicación del selector Klein/Gross de la cámara térmica del tanque Leopard 2A4, que permita optimizar su ergonomía, como sigue:

1. Fácil detección por el artillero.
2. Rápida operación.
3. Óptima ergonomía.
4. Sistema seguro.

Terminado el levantamiento de los requerimientos y las respectivas verificaciones y validaciones, se procedió al análisis funcional, que constituye el siguiente paso en el proceso de ingeniería de sistemas y que cumple la misión de transformar los requisitos del sistema en criterios detallados de diseño y la identificación de los requisitos de recursos específicos a nivel del subsistema e inferior (Blanchard, 1995, p. 47).

Finalmente se procedió a utilizar el *software* PSM32, basado en una “matriz n^2 ”, que tiene por objetivo identificar la relación entre las funciones determinadas con anterioridad, facilitando la conformación de subsistemas que poseerá el sistema de selección de imagen Klein/Gross (Figura N° 12), concluyendo en los siguientes:

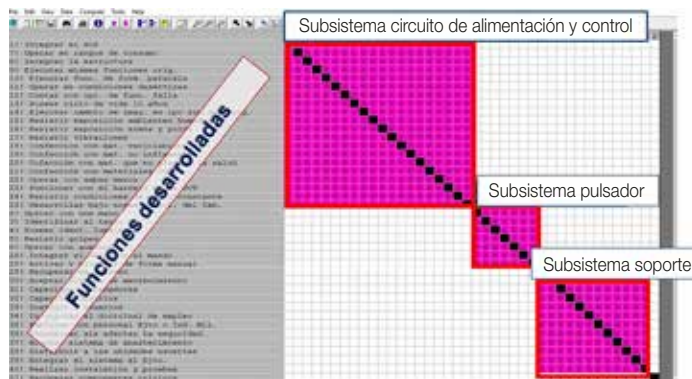


Figura N° 12: “Software PSM32 Matriz n^2 ”.

Fuente: elaboración propia.



7. DISEÑO DEL SISTEMA

Una vez definida la arquitectura funcional, se procedió a diseñar metodológicamente el selector de aumento óptico de la cámara térmica. Como primera medida, se estudió la ergonomía, con la finalidad de establecer la ubicación. Dentro de la amplia gama de estudios que realiza la ergonomía, se decidió investigar los aspectos biomecánicos, que se refieren a posturas y movimientos durante el trabajo, con la finalidad de conocer los procesos, las cargas y su distribución dentro del sistema.

Lo anterior se encuentra basado en el análisis de las diferentes posturas realizadas por el artillero en su interacción con el selector. Se comenzó por la evaluación de las condiciones físicas del puesto de trabajo asociadas al análisis de la actividad, para continuar con el procedimiento, el objeto y, finalmente, el sujeto, tal como se muestra en la Figura N° 13, “Proceso de estudio ergonómico”.



Figura N° 13: “Proceso de estudio ergonómico”.

Fuente: elaboración propia.

En resumen, el procedimiento hace que el movimiento del brazo sea de forma repetitiva en una dirección prácticamente horizontal, lo que genera un desgaste para el usuario, debido a esta acción, además de tener que operar el mando con una mano en ese momento (Figura N° 14).



Figura N° 14: “Movimiento de la mano para el cambio de imagen”.

Fuente: elaboración propia.



El objeto, finalmente, consiste en seleccionar el lugar óptimo de ubicación del selector, con la intención de mejorar la eficiencia del artillero en su empleo, teniendo presente los requerimientos desarrollados en el capítulo anterior, pero viendo la factibilidad tanto estructural como técnica de la implementación, además de cinco variables, analizadas con expertos y usuarios, establecidas como prioritarias a cumplir: distancia a la posición base del artillero, movimiento para su accionamiento, comodidad, seguridad, tiempo de ejecución.

Para poder determinar cuál de las cuatro opciones establecidas es la que reúne las mejores condiciones para la implementación del sistema selector secundario, sin considerar lo solicitado por los usuarios, se utilizó la herramienta “proceso jerárquico analítico” (AHP), a través del programa “Expert Choice” sobre la base de cuatro opciones, cuyo resultado arrojó (Figura N° 15) como el lugar con mayor ponderación las empuñaduras del mando, con un 49,8%.

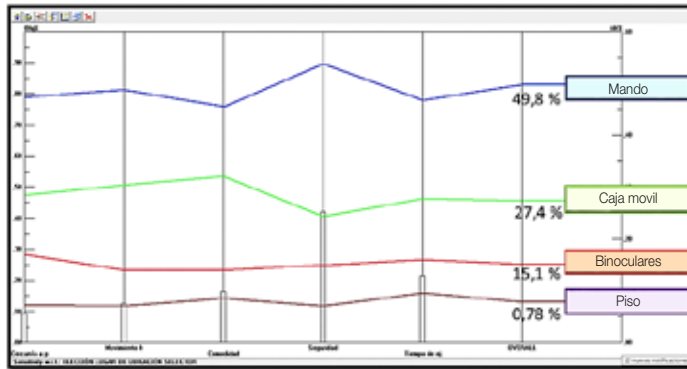


Figura N° 15: “Gráfico del resultado entregado por el programa Expert Choice”.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se verificó con expertos en electrónica, las posibles ubicaciones donde la configuración del mando permitiera insertar un selector (Figura N° 16).



Figura N° 16: “Empuñaduras del mando, vista interior”.

Fuente: elaboración propia.



Analizada la empuñadura en cuanto a los espacios y electrónica, se establecieron cuatro opciones, las que se consultaron a los usuarios del sistema, brigadas acorazadas y CECOM-BAC. Si bien hubo algunas opiniones diferentes, la opción seleccionada fue en la empuñadura izquierda y derecha, en forma de espejo, que quiere decir a ambos lados de igual forma, como los demás componentes del mando, para no limitar al artillero a una sola mano en su empleo, dándole, en último término, mayor libertad de elección y facilidades para su utilización.

Si bien el resultado arrojó que el sistema debía instalarse en el mando, era necesario tener mayor información para establecer el lugar exacto de ubicación, que permitiera que la operación se realizase a una altura alrededor del codo, sin inclinación ni giros del cuerpo, a través de un agarre del mando con una presión dígito-palmar.

Para tal efecto, ocho dimensiones de la mano fueron identificadas como útiles para el diseño de la ubicación del selector: longitud de la mano, longitud de la palma, ancho de la mano, ancho máximo de la mano, diámetro de agarre, espesor de la mano, circunferencia de la mano y circunferencia máxima de la mano. Además de lo anterior, se consideró la longitud de las falanges de los dedos, especialmente la del dedo pulgar, que será el que ejecutará la acción.

Para esto, se consideró un estudio de la mano efectuado por la Escuela de Kinesiología de la Universidad de Chile, titulado “Estudio Piloto de Medidas Antropométricas¹¹ de la Mano y Fuerzas de Prensión, Aplicables al Diseño de Herramientas Manuales”, año 2010 (Tabla N° 1).

DIMENSIONES DE LA MANO	MEDIA DE LAS DIMENSIONES DE LA MANO (CM)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	MÍNIMO (CM)	MÁXIMO (CM)	POSICIÓN DÍGITO PALMAR
Largo mano	10,43	0,71	9,1	12	
Largo máximo	18,83	1	17,1	21,1	
Ancho mano	8,53	0,56	7,0	9,8	
Ancho máximo	10,55	1,29	8,8	16,5	
Diámetro de agarre	14,97	1,09	12,3	17	
Espesor de la mano	2,8	0,33	2,0	4,0	
Circunferencia de la mano	20,53	1,21	17,8	23,5	
Circunferencia máxima	25,1	1,32	22,1	27,7	
Longitud falange 1	6,47	0,52	5,2	7,4	
Longitud falange 2	9,51	0,62	8,4	11,0	
Longitud falange 3	10,68	0,65	9,4	12,0	
Longitud falange 4	10,12	0,75	8,4	11,8	
Longitud falange 5	7,88	0,62	6,3	9,3	

Tabla N° 1: “Características antropométricas de la mano”.

Fuente: Cubillos, 2010.

11 Antropometría es una rama de las ciencias humanas que se dedica al estudio de las proporciones y las medidas del cuerpo humano.



Debido a esto, se adaptó, finalmente, a la postura natural de asimiento de la mano, lo que derivó en la siguiente ubicación (Figura N° 18).

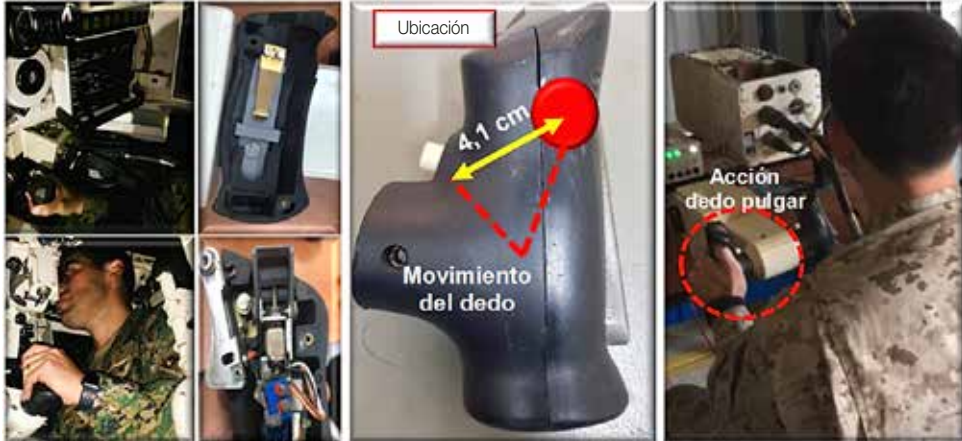


Figura N° 18: "Ubicación propuesta del selector Klein/Gross".

Fuente: elaboración propia.

La ubicación seleccionada permite dar cumplimiento a lo esperado y mencionado con anterioridad, ya que entrega una flexión del dedo pulgar que hace posible transmitir con facilidad la fuerza hacia el selector, reduciendo en gran medida los movimientos y la distancia de desplazamiento que se realizan al utilizar el selector principal de la UCT.

8. SISTEMA DE SELECCIÓN DE IMAGEN KLEIN/GROSS

Para la fase final, en la síntesis del sistema, se procedió a transformar la descripción funcional del sistema en una configuración física de *hardware*, *software*, personal e instalaciones. Es decir, en esta etapa los "qué" se transforman en "cómo", obteniéndose una definición del sistema en términos de sus componentes (configuración preliminar).

Con los antecedentes antes descritos, se procedió a realizar el diseño de un circuito que permitiera ejecutar las mismas funciones que el original, pero esta vez de un pulsador fuera de la UCT. Este trabajo fue realizado en instalaciones de FAMAE, específicamente en el CMEOT con el Sr. Francisco Dechent, donde se llegó a la conclusión que, para cumplir el objetivo planteado, primero había que partir por anclarse a los pines del circuito que se enlazan con la cámara térmica, como también a los pines del selector, circuito que debe poseer toda la electrónica original con la integración del nuevo sistema, que permitiera adaptarse a la UCT. Diseño que finalmente logró, de forma exitosa, el funcionamiento esperado, sin influir en el consumo ni tampoco en el voltaje. Para ello, se cumplió con cierto protocolo de activación como a continuación se detalla:



Diseño conceptual de la modificación de la posición del selector de aumento óptico de la cámara térmica...

- a. Para activar el nuevo sistema, el selector original de la UCT debe estar en posición Gross y presionar una vez el nuevo pulsador, quedando activado el nuevo sistema, en condiciones de ejecutar los cambios de visión a requerimiento del artillero.
- b. Para desactivarlo, solo se debe cambiar la posición del selector original de la UCT. Esto quiere decir posición Klein, el cual a su vez realizará el cambio de imagen.
- c. Para volver a activarlo, solo se debe repetir el punto número uno.
- d. En caso de falla del nuevo sistema, no afecta el normal funcionamiento del selector original.

Consecuente con lo anterior, se procedió a identificar la tecnología y electrónica necesaria para poder dar cumplimiento a la totalidad de requerimientos y funciones establecidas.

Los componentes y partes de cada subsistema definidos dieron como resultado la arquitectura física definitiva conforme a la Figura N° 19, lo que permitió, a su vez, tener una visión más concreta de cómo sería este diseño (Figura N° 20).

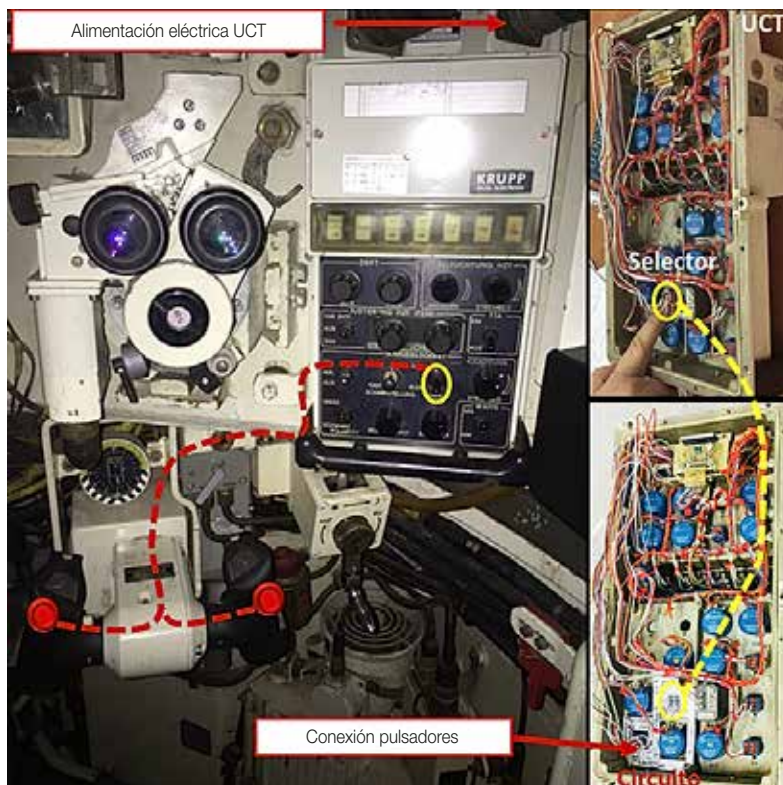


Figura N° 19: "Diseño de arquitectura física".

Fuente: elaboración propia.

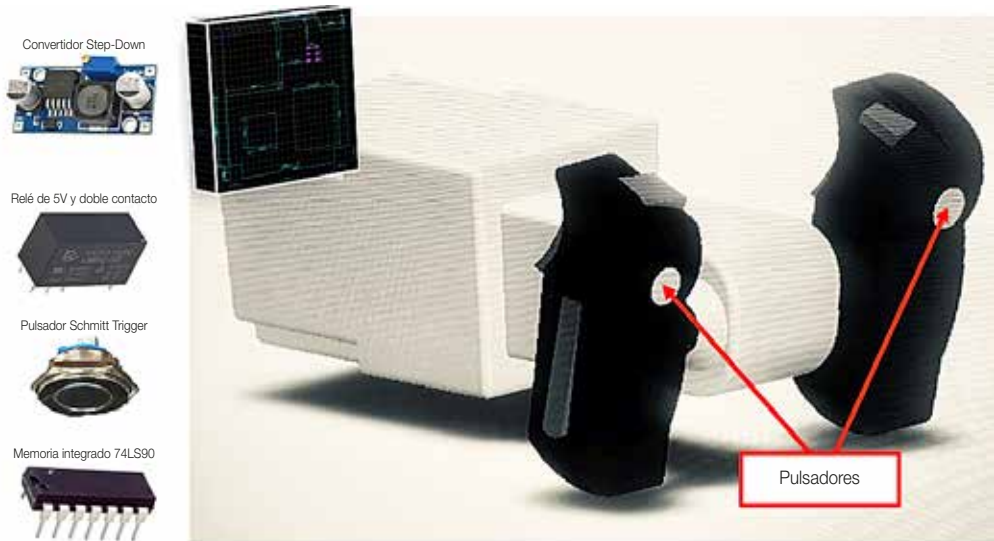


Figura N° 20: "Visión de diseño del sistema".

Fuente: elaboración propia.

9. VALIDACIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL DEL SELECTOR DE AUMENTO ÓPTICO DE LA CÁMARA TÉRMICA

La validación se realizó a través de un demostrador tecnológico, que incorporó los componentes y partes de los subsistemas seleccionados de acuerdo con sus características técnicas y físicas, el que fue integrado al Sistema de Control de Fuego (SCF) del tanque con la finalidad de someterlo a las pruebas que permitieron la validación correspondiente.

Este trabajo se realizó, principalmente, en dependencias del CMEOT FAMA E, pero, a la vez, contó con la importante participación de la empresa TRES DP, con quien se trabajó el diseño final del mando, específicamente de la empuñadura en impresión 3D. En la fase de validación, en tanto, se trabajó con el Instituto de Investigación y Control del Ejército (IDIC), para la ejecución y validación del sistema sometido a pruebas ambientales de temperatura, humedad y vibraciones.

Finalmente, posterior a las pruebas, se procedió a analizar los datos obtenidos, con la finalidad de establecer los cambios necesarios al diseño y validar el proyecto.

9.1. Construcción del demostrador tecnológico

La construcción del demostrador tecnológico tuvo varias etapas, las que consideraron tanto la confección del circuito de alimentación y control, integración



al SCF y la adaptación del pulsador del mando del artillero, según se detalla a continuación.

9.1.1. Confección del circuito

El circuito, en función al diseño conceptual establecido y a la selección de partes y componentes, derivó en un diseño de circuito conforme a la Figura N° 21 que a continuación se detalla:

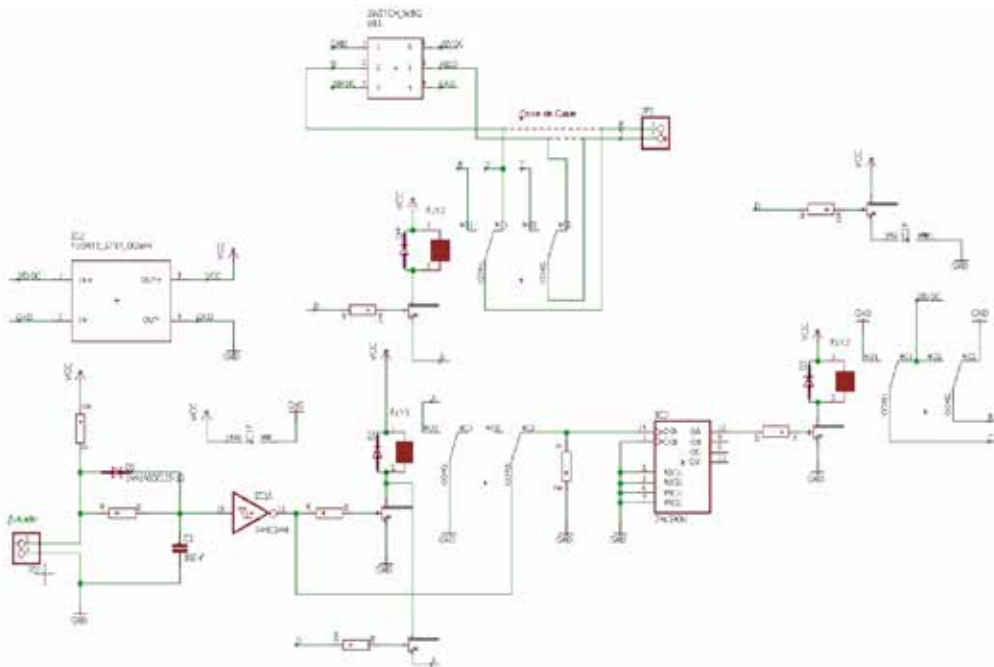


Figura N° 21: "Diseño final del circuito de alimentación y control".

Fuente: Dechent, 2018.

Seguidamente este circuito fue integrado a la tarjeta de circuito impreso (PCB), con las medidas disponibles de la UCT, de lo que se obtuvo el diseño (Figura N° 22), que incluye la totalidad de componentes y partes seleccionados para su funcionamiento, donde se destacan los siguientes:

- N° 1: fuente de alimentación Step-Down.
- N° 2: memoria 74LS90.
- N° 3: control debouncing 74CH14.
- N° 4: conexión pulsador pines 28VDC y 0VDC.
- N° 5: conexión pines R y T que van al motor de la cámara.

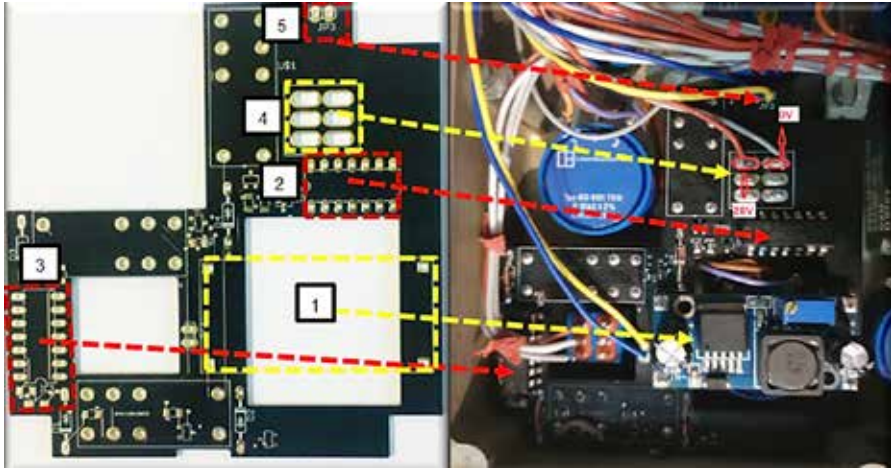


Figura N° 22: "Circuito impreso con integración de componentes y partes".

Fuente: Dechent, 2018.

9.1.2. Integración del pulsador al mando

Ya en funcionamiento el circuito, se hizo necesario ver la forma de insertar el pulsador en el mando con las consideraciones vistas en el análisis ergonómico, la cual siguió la siguiente secuencia:

1) Prueba N° 1: consistió en perforar la empuñadura exterior del mando y ubicar el selector en el lugar seleccionado, conforme al estudio ergonómico de la mano, específicamente del movimiento del dedo pulgar como se muestra en la Figura N° 23.



Figura N° 23: "Pulsador, prueba N° 1".

Fuente: elaboración propia.



La ubicación seleccionada permitió instalar el pulsador sin problema. La electrónica interna de la empuñadura no se vio afectada. Sin embargo, existieron puntos a mejorar, ya que el afianzamiento a la estructura no era el óptimo.

2) Prueba N° 2: se buscó la forma de dar solución a este problema añadiendo acero líquido, que permitiera fijar el pulsador a la pieza con la finalidad de poder manipularlo y que este no se mueva al ejercer presión (Figura N° 24).



Figura N° 24: "Pulsador, prueba N° 2".

Fuente: elaboración propia.

Funcionalmente el pulsador cumplía con los requerimientos esperados, pero quedaba la inquietud de mejorar la estética de este, además de revisar la forma de entregar un mejor soporte al pulsador, lo que se fue trabajando en forma paralela mientras se realizaban pruebas de verificación tanto de la funcionalidad como de la integración del sistema.

9.2. Montaje en el banco de pruebas

Para realizar las pruebas de funcionamiento, se procedió a montar los componentes del SCF que están involucrados en el cambio de imagen de la cámara térmica en un banco de pruebas, de manera de integrarlos y poder comprobar que el sistema cumplía con lo esperado, como a continuación se detalla en la Figura N° 25.

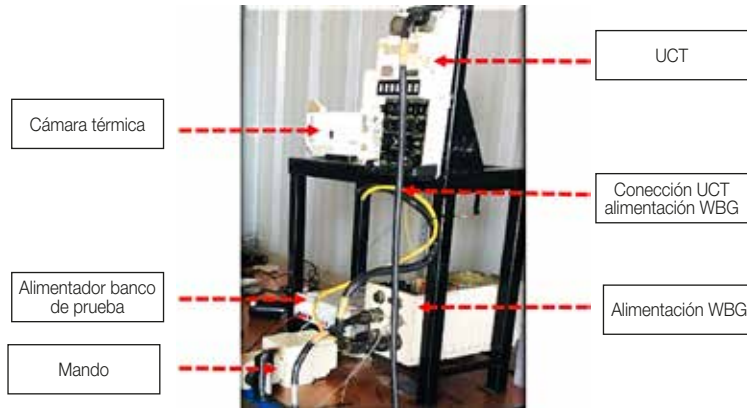


Figura N° 25: “Banco de pruebas demostrador tecnológico”.

Fuente: elaboración propia.

Puesto en funcionamiento el demostrador tecnológico, se pudo verificar, de manera exitosa, el cumplimiento de los objetivos esperados, cumpliendo con el protocolo de activación y requerimientos relevantes como a continuación se detalla:

- 1) Selector original de la UCT en posición Gross.
- 2) Presionar una vez el nuevo pulsador, quedando activado el nuevo sistema, en condiciones de ejecutar los cambios de visión a requerimiento del artillero.
- 3) Desactivarlo, cambiando a posición del selector original de la UCT a Klein, el que realiza, a la vez, el cambio de imagen.
- 4) Activar nuevamente el pulsador, repitiendo punto números uno y dos.
- 5) Simular falla del nuevo sistema, sin afectar el normal funcionamiento del selector original.

Para analizar los tiempos de activación, se utilizó el osciloscopio, midiendo en escala de tiempo el rendimiento de los dos sistemas: el selector original y el propuesto por el proyecto (Figura N° 26).



Figura N° 26: “Osciloscopio con señal de tiempo de activación Zoom Óptico”.

Fuente: Dechent, 2018.



En escala de tiempo de 250 microsegundos, se pudo analizar que el tiempo de alimentación o cambio de polaridad utilizando el sistema original es de 370 microsegundos, además de incluir una gran cantidad de ruido y rebotes a causa del mecanismo interno del interruptor.

En la misma escala de tiempo, el prototipo produce mucho menos ruido que el sistema original, además de concretarse en 200 microsegundos, con lo que se puede determinar que el sistema nuevo puede funcionar de manera más rápida y con menos ruido eléctrico.

9.3. Pruebas ambientales

Posteriormente era necesario someter a pruebas ambientales los equipos UCT y Mando, con los componentes y partes integrados, pruebas que simularán el ambiente de trabajo del tanque Leopard 2A4.

En esta etapa se contó con el apoyo del IDIC, que monitoreó los equipos sometidos a tres pruebas: temperatura, vibración y humedad (Figura N° 27).



Figura N° 27: "Pruebas de vibración, temperatura y humedad".

Fuente: elaboración propia.

Lo anterior se realizó bajo normas MIL-STD,¹² cuyos resultados (Tabla N° 2) fueron exitosos, ya que en las tres pruebas se cumple con los parámetros de funcionamiento requeridos para su empleo en las condiciones que ofrece el norte del país.

12 Estándar emitido por el Comando de Pruebas de Desarrollo del Ejército de Estados Unidos. El estándar consiste en una serie de pruebas ambientales para demostrar que el equipo cumple con lo necesario para sobrevivir en el campo de batalla.



PRUEBA	REQUERIMIENTO	MÉTODO	CONDICIÓN DE LA PRUEBA	EQUIPO	
				MANDO DEL ARTILLERO	UCT
Inspección visual y funcionamiento	Vibración	MIL-STD-810G w/CHANGE 1 METHOD 514.7	Frecuencia entre 10 a 20 Hz, 1.6 g, durante 30 min vertical y horizontal	Cumple	Cumple
	Alta temperatura y humedad	MIL-STD-810G w/CHANGE 1 METHOD 501.6 y 507.6	Sometido a 50 °C, humedad relativa de 40% durante 4 horas	Cumple	Cumple
	Baja temperatura	MIL-STD-810G w/CHANGE 1 METHOD 501.6	Sometido a -15 °C, durante 4 horas	Cumple	Cumple

Tabla N° 2: "IDIC, resultado de pruebas ambientales".
Fuente: IDIC, 2018.

9.4. Diseño de una empuñadura 3D

Como se mencionó anteriormente, de manera paralela, se estudió la forma de mejorar la ubicación del pulsador, que le entregará un mejor soporte al pulsador y evitará tener que perforar las empuñaduras de los mandos. Es así como se llegó a la empresa Tresdp, especialista en impresiones 3D,¹³ que realizó un trabajo de levantamiento de la estructura del mando del artillero, con la finalidad de trabajar en un diseño que permitiera la instalación del pulsador (Figura N° 28), manteniendo la estructura original de la empuñadura.



Figura N° 28: "Reunión y trabajo de empresa Tresdp".
Fuente: elaboración propia.

13 La tecnología de impresión 3D puede utilizarse para crear todo tipo de cosas, desde prototipos y piezas simples hasta productos finales altamente técnicos, como piezas para aeronaves, edificios ecológicos, implantes médicos que pueden salvar vidas e, incluso, órganos artificiales que se producen con capas de células humanas.



En este trabajo se pasó por varias iteraciones del diseño que, finalmente, derivaron en el modelo de prueba que presenta la Figura N° 29, el que se adapta perfectamente al mando y componentes originales.



Figura N° 29: "Fases Tresdp".

Fuente: elaboración propia.

Una vez finalizado el trabajo de impresión, se procedió a instalar la totalidad de los componentes para ejecutar la prueba final, en el habitáculo del artillero del tanque.

9.5. Implementación en el tanque

Con todos los componentes analizados y probados en el banco de pruebas, se procedió a la implementación en el tanque, con la finalidad de realizar la validación con expertos tanto usuarios como electrónicos (Figura N° 30).



Figura N° 30: "Implementación del sistema en el tanque para su validación".

Fuente: archivo del autor.



La implantación consistió, al igual que en el banco de pruebas, en instalar la UCT con el subsistema circuito y alimentación integrado y el mando con los pulsadores en las bases impresas en 3D, los que debían permitir el cambio de imagen de la cámara térmica, esta vez en forma de espejo, en ambas empuñaduras, sin presentar diferencias a lo anteriormente verificado en el banco de pruebas con un solo pulsador.

Una vez realizada la verificación de funcionamiento, se procedió a efectuar las pruebas de validación (Figura N° 31), conforme a un protocolo confeccionado para este efecto, el que pone finalmente a prueba el sistema y verifica el cumplimiento de los requerimientos que fueron establecidos durante el desarrollo de la presente investigación.



Figura N° 31: "Pruebas de validación".

Fuente: elaboración propia.

9.6. Análisis de datos preestablecidos

Los resultados de las pruebas de validación fueron exitosos prácticamente en su totalidad. El único requerimiento con el que no se cumplió fue el de ser identificado en la oscuridad, el cual es de categoría "deseable", no relevante para el funcionamiento y operación del sistema por parte del artillero.

Por otra parte, se cumplieron los objetivos establecidos en el estudio ergonómico, que buscaban: disminuir la distancia del pulsador a la posición base del artillero; poder realizar un movimiento horizontal para su accionamiento; entregar comodidad; y, a la vez, ser un sistema seguro de manipular, que disminuya los tiempos de activación, aspecto que cumple a cabalidad la modificación de la ubicación del selector propuesta.



De este análisis destacan los tiempos de ejecución de cambios de imagen, el que consistió en pasar del campo *Gross* al campo *Klein*, desde una posición de inicio con ambas manos en el mando del artillero, obteniendo los siguientes resultados (Tabla N° 3).

N°	TIEMPO SELECTOR ORIGINAL UCT	DEMOSTRADOR TECNOLÓGICO
1	2,7 s	0,6 s
2	2,1 s	0,3 s
3	1,98 s	0,4 s
4	2,3 s	0,3 s
5	2,6 s	0,4 s
Promedio	2,34 s	0,4 s

Tabla N° 3: "Comparación de tiempos de ejecución".

Fuente: elaboración propia.

Lo anterior se realizó bajo condiciones ideales de uso y en forma estática, logrando una diferencia de tiempo promedio a favor de 1,94 segundos, lo que en movimiento y, bajo situación de estrés de combate, puede ser incrementado.

Otro punto importante a destacar fue la tranquilidad que dio la nueva ubicación al artillero que ejecutó las pruebas, cumpliendo, como se mencionó en el primer párrafo, con éxito prácticamente la totalidad de los requerimientos operacionales planteados, destacando el no perder la concentración sobre el objetivo y lograr completa integración al sistema de control de fuego, entre otros, lo que finalmente se concluyó con la impresión en 3D de la empuñadura final (Figura N° 32).



Figura N° 32: "Impresión 3D final".

Fuente: elaboración propia.



Con los antecedentes y resultados obtenidos, se da por validada la presente investigación, resultado gratificante, ya que este trabajo mejora de manera trascendental la eficiencia de combate del sistema de armas más importante que posee la Fuerza Terrestre, el tanque Leopard 2A4.

10. CONCLUSIONES

Se dio cumplimiento al objetivo de la investigación, que consistía en desarrollar un diseño conceptual de la modificación de la posición del selector de aumento óptico de la cámara térmica del tanque Leopard 2A4, que optimice su ergonomía y entregue una mayor eficiencia tanto en la búsqueda de objetivos como en el tiro.

El nuevo sistema permite una mayor concentración en el visor térmico y disminuye los movimientos que se realizan al tener que ubicar y utilizar el selector de la UCT, lo que, a la vez, entrega tranquilidad para el usuario en un ambiente de estrés.

Se redujo en un 83% el tiempo en el cambio de imagen, lo que se traduce en una disminución en el tiempo del tiro y de la probabilidad de ser dado de baja por el adversario, en caso de enfrentamiento.

El levantamiento metodológico de los requerimientos permitió que, finalmente, se diera cumplimiento al 97,5% de estos.

Se alcanzó la meta impuesta por el investigador, la cual consistía en buscar una solución innovadora, eficiente y económica. Lo anterior, debido a que los costos de los materiales para la implementación del nuevo sistema fue de \$151.081, sin considerar la mano de obra. Es importante destacar que este trabajo puede ser ejecutado tanto por la industria militar (FAMAE), como por las unidades de mantenimiento del Ejército, con la correspondiente capacitación.

El proyecto es, sin lugar a dudas, una demostración de la capacidad tanto del personal de ingenieros que prepara la Institución como el de la Industria Militar, quienes poseen competencias para incorporar tecnología en la optimización de sistemas de armas, mejorando sus prestaciones de diseño y facilitando el empleo de los usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

Blanchard, B. (1995). *Ingeniería de sistemas*. Madrid: ISDEFE.

Bursuk, C. (2018). Entrevista hecha por Juan Beyer. Santiago de Chile: ACAPOMIL.



CECOMBAC (2016). Curso Artillero. *Presentación de aparatos de observación y puntería del tanque Leopard 2A4*. Iquique, Chile: Ejército de Chile.

Cerda, E. (2014). *Apuntes de la cátedra de ergonomía*. Santiago de Chile: ACAPOMIL.

Cubillos, N. (2010). *Estudio piloto de medidas antropométricas de la mano y fuerzas de prensión, aplicables al diseño de herramientas manuales*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Dechent, F. (2018). *Ingeniero electrónico*. Santiago, Chile: CMEOT, FAMAÉ.

División Doctrina (2011). *Manual del Tanque y Pelotón de Tanque, MDO-60303*. Santiago, Chile: Ejército de Chile.

División Doctrina (2014). *Manual de Operación del Tanque Leopard 2A4, CDO-70301*. Santiago, Chile: Ejército de Chile.

División Doctrina (2014). *Manual de Proceso de Desarrollo de Capacidades Militares y Administración del Ciclo de Vida, RAA-03008*. Santiago, Chile: Ejército de Chile.

IDIC (2018). *Informe técnico de pruebas ambientales*. Santiago, Chile: Ejército de Chile.

Krauss, Maffei (2018). *Presentación propuesta cámara térmica ATTICA*. Santiago, Chile: FAMAÉ.

Leoben Combat Developmed Working Group Meeting. (2015). *Presentación Swedish Armed Forces*. Viena, Austria.

Quiñones, E. (2018). *Clases de Ingeniería de Sistemas*. Santiago, Chile: ACAPOMIL.

Díaz, M. (2018). *Clases de Sistemas Tecnológicos Militares*. Santiago, Chile: ACAPOMIL.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**DISEÑO PRELIMINAR DE UN DISPOSITIVO
DEFLAGRADOR-DESPOLETADOR DE
UXOs A BASE DE UNA REACCIÓN DE ALTA
TEMPERATURA PARA OPERACIONES EOD**

MAY. PABLO OVALLE VÁSQUEZ



DISEÑO PRELIMINAR DE UN DISPOSITIVO DEFLAGRADOR- DESPOLETADOR DE UXOs A BASE DE UNA REACCIÓN DE ALTA TEMPERATURA PARA OPERACIONES EOD

MAY. Pablo Ovalle Vásquez¹

Resumen: *el propósito de la presente investigación es ir en apoyo de las operaciones EOD² a nivel institucional, mediante el diseño de un prototipo que permita obtener una deflagración al momento de neutralizar un artefacto explosivo en áreas pobladas o que presenten riesgos de daños colaterales, disminuyendo los posibles efectos negativos causados por la detonación de la carga principal. Su elaboración se desarrolló a través de la ingeniería de sistemas, con la que se pudo determinar el tipo de reacción química adecuada mediante pruebas, así como las mediciones de transferencia de calor que permitieron seleccionar el material aislante para la construcción del contenedor. Finalmente, se validaron las pruebas sobre un artefacto explosivo a escala (inerte), lo que permitió determinar la capacidad de perforación en metal y deflagración de explosivo, dando así solución al problema planteado.*

Palabras clave: *deflagración, aluminotermia, exotérmica, reacción de alta temperatura.*

Abstract: *the purpose of the present investigation is to support the EOD operations at institutional level, through the design of a prototype that allows to obtain a deflagration at the moment of neutralizing an explosive device in populated areas or that present risks of collateral damage, diminishing the damages or negative effects by a detonation of the main load. Its elaboration was developed through systems engineering methodology, to define the proper chemical reaction through tests, and also the results of the heat transfer in order to select the insulating material for the container's*

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Municiones, Propelentes y Explosivos.

² EOD, del inglés explosive ordnance disposal.



construction. Finally, the tests were validated on an explosive device an escalation (inert) that allows to determine the drilling capacity in the metal and the explosive deflagration, as well as the solution to the problem set out.

Keywords: *deflagration, aluminothermy, exothermic, high temperature reaction.*

1. INTRODUCCIÓN

En los actuales conflictos, operaciones de guerra y distintas a la guerra, la fuerza militar debe contar con unidades (EOD) que tengan la capacidad de neutralización o desactivación de munición sin detonar (UXO),³ de artefactos improvisados (IEDs)⁴ y de restos explosivos de guerra (ERW),⁵ los cuales son encontrados en el terreno por el desarrollo de las operaciones de combate y de apoyo, y en los campos de instrucción activos y en receso, donde, producto de ejercicios de instrucción, entrenamientos, maniobras, accidentes o desastres naturales, quedan esparcidos sin su correspondiente levantamiento (Procedimientos EOD, Ejército de Chile, 2015).

En la actualidad, en nuestro país aún existen campos minados y predios de instrucciones cerrados, cedidos o vendidos, en los cuales, por diversas razones, han quedado olvidados en el tiempo distintos tipos de artefactos explosivos, que van desde minas antitanques o antipersonales hasta municiones de armamento mayor. Además de desconocerse su ubicación, los factores climáticos han provocado que estas piezas se desplacen en el terreno, por lo que han reaparecido, tiempo después, cercanas a lugares poblados o en zonas donde su detonación generaría un daño colateral tanto a personas, como a infraestructura.

2. DESARROLLO

Actualmente la fuerza militar, para lograr neutralizar un artefacto explosivo, utiliza cargas de “bajo orden”,⁶ con el fin de mitigar los daños y efectos negativos al momento de la limpieza de áreas contaminadas por artefactos explosivos. Para ello, las unidades EOD de nuestro país utilizan la carga SM-EOD20, careciendo de otros medios que permitan lograr el bajo orden necesario para neutralizar un artefacto explosivo, lo cual se convierte en una proposición de estudio relevante para el desarrollo de la industria, para el Arma de Ingenieros y las unidades EOD de la Institución.

3 UXO: del inglés *unexploded ordnance*.

4 IED: sigla del inglés, artefacto explosivo improvisado.

5 ERW: municiones explosivas que quedan después de que un conflicto ha terminado.

6 Bajo orden: neutralizar un explosivo sin el riesgo de que detone.



Cabe mencionar que cada tipo de munición plantea diferentes desafíos para detección y neutralización. Históricamente, los militares no han rastreado dónde aterrizan los proyectiles de artillería después de que una pieza ha sido disparada. Actualmente, algunas municiones son seguidas, pero se debe transformar en un requisito monitorear todo tipo de munición y dónde estas caen (Macdonald, 2001).

2.1. *Low ordnance* (bajo orden)

Se aplican con medios de neutralización que busquen una deflagración del explosivo contenido en el interior de la munición, lográndose lo que muestra la Figura N° 1: una separación de sus componentes y deflagración del explosivo.



Figura N° 1: "Neutralización en "Low Order"".

Fuente: Procedimientos EOD, Ejército de Chile, 2015.

Dentro de los métodos y procedimientos de bajo orden, existen técnicas como la separación mecánica, la cual busca distanciar, generalmente, la espoleta del cuerpo de la munición, para lo cual se emplean medios mecánicos, que golpeen la munición en forma violenta. El problema de este procedimiento radica en que existe una transferencia de energía cinética, la cual, al ser generada de manera violenta, es capaz de producir la detonación. Otra técnicas o métodos de bajo orden son la disruptiva y manual, las que dependerán, al igual que la anterior, del estado en que se encuentre el artefacto explosivo.

Para neutralizar un artefacto explosivo (a través del bajo orden), la Institución utiliza la carga SM-EOD20, la cual se muestra en Figura N° 2.



2.2. Carga de bajo orden SM-EOD 20

Las empresas ATK (USA) y RUAG (Suiza) producen la familia SM-EOD⁷ como sistemas de eliminación de artefactos explosivos, la cual considera todos los tipos de minas y artefactos explosivos sin detonar, demostrando un alto grado de precisión. Las cargas explosivas SM-EOD20 constan de RDX⁸ como explosivo principal, además de cera y grafito. Estas se pueden iniciar de forma eléctrica o pirotécnica (estopín N° 8 o equivalente), pero no se pueden iniciar con el cordón de detonación o tubo de choque. El sistema SM-EOD se ofrece con una gama de accesorios de montaje, ya que se pueden utilizar en prácticamente todos los tipos de terreno y bajo cualquier condición atmosférica e, inclusive, bajo el agua.

Estas cargas SM-EOD fueron desarrolladas, fabricadas y calificadas de acuerdo con los estándares MIL⁹ y OTAN¹⁰ (Institute for Defense Analyses, 2005).



Dimensiones

Diámetro exterior	24 mm
Largo	55 mm

Peso

Por carga	72 g incluye trípode
Por paquete	1.500 g

Explosivo

Por carga	11,5 g
-----------	--------

Desempeño

En acero de blindaje	hasta 55 mm de penetración hasta 6 mm de diámetro
----------------------	--

Rango de funcionamiento	-35 °C a 63 °C
Bajo el agua	50 m

Radio de seguridad	50 m solo para la carga
--------------------	-------------------------

Figura N° 2: "Especificaciones técnicas de la carga SM-EOD20".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

-
- 7 SM-EOD, acrónimo de la compañía. Schweizerische Munitionsunternehmung company (SM). Tipo de carga explosiva con efecto Monroe.
 - 8 La ciclotrimetilentrinitramina (RDX) es un explosivo nitroamina utilizado ampliamente en aplicaciones militares e industriales.
 - 9 Estándar MIL, del inglés *military estándar*.
 - 10 Organización del Tratado del Atlántico Norte.



El gráfico de la Figura N° 3 muestra el poder de perforación en mm (eje Y) y la separación del objetivo o *standoff* en mm (eje X) en condiciones ideales como lo muestra la línea verde, mientras que la línea azul representa la capacidad de perforación bajo el agua.

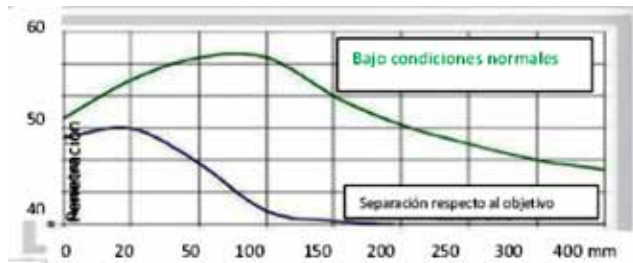


Figura N° 3: "Poder de penetración en láminas de acero, bajo condiciones ideales y no ideales".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DEFLAGRADORES USADOS EN EL MUNDO

El principio de todo sistema deflagrador es entregar una temperatura elevada que permita perforar el contenedor del explosivo, ya sea metálico o plástico, para, finalmente, alcanzar el explosivo y producir su combustión (deflagración), logrando un compartimiento vacío. Cabe indicar que el riesgo de detonación siempre estará presente, sea cual sea el método a emplear. En el caso de la deflagración, es importante destacar que, de llegar a producirse una detonación, el proyectil ya se encontraría perforado, es decir, perdería su confinamiento y cuando la temperatura alcance la carga del mecanismo de iniciación, el explosivo principal ya habrá perdido gran parte de su masa. Lo anterior favorece la disminución de los daños colaterales generado por una detonación por vías normales del explosivo.

A continuación se muestra la Tabla N° 1 con diversos sistemas deflagradores, los que buscan perforar el contenedor y llegar al explosivo principal para producir la deflagración de este y entregar un compartimiento metálico vacío.

N°	SISTEMA	DISPOSITIVO	COMPUESTO QUÍMICO	ENVASE
1	FireAnt	Bengala	Mezcla pirotécnica metálica	Tubo de cartón
2	Hyperheat Mine Flare	Bengala	Mezcla pirotécnica metálica	Tubo de cartón fenólico
3	Propellant Torch System	Antorcha	Mezcla de propelente metálico	Tubo de cartón fenólico
4	Pyropak	Líquido caliente	Mezcla de termita recubierta	Bolsa de polipropileno
5	Pyro-Torch System	Antorcha	Metal reactivo intermetálico	Tubo de cartón fenólico
6	Thiokol Demining Flare	Bengala	Mezcla de propelente metálico	Tubo de cartón fenólico

Tabla N° 1: "Sistemas deflagradores".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.



3.1. *FireAnt*

Es un dispositivo de deflagración que contiene 80 g de una mezcla pirotécnica (aluminio, nitrato de bario y cloruro de polivinilo [PVC]) encerrada en una caja de cartón. Es cilíndrico, la carcasa mide 9,33 pulgadas (23,70 cm) de largo y tiene un diámetro de 1,53 pulgadas (3,89 cm). Con un tiempo de duración de 23-24 segundos, la llama de la bengala alcanza los 1.500 °C (2.732 °F). *FireAnt* se enciende con un iniciador eléctrico incorporado y puede penetrar placas de acero de hasta 1/16 pulg. (1.5 mm) de espesor. Los *FireAnt* se comportan bien contra el plástico y las cajas metálicas delgadas de una mina antipersonal (AP) y minas antitanques (AT). El sistema debe colocarse entre 0.6 pulg. (1.5 cm) y 1.2 pulg. (3 cm) de la mina como se muestra en la Figura N° 4.



Figura N° 4: "FireAnt® contra VS-50 mina antipersonal (izquierda) y TMRP-6 mina antitanque (derecha)".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

3.2. *Hyperheat Mine Flare*

Hyperheat Mine Flare es un dispositivo de bengala autónomo utilizado para minas terrestres mediante un proceso de incineración *in situ* logrando la neutralización. Este dispositivo de deflagración puede colocarse en el suelo o verticalmente montado con el extremo de la antorcha cerca del objetivo, como se muestra en la Figura N° 5. La ignición de la llama se inicia por una conexión eléctrica activada de forma remota mediante un dispositivo que le proporcione baja corriente, lo que permite una distancia segura de trabajo. Cada *Hyperheat Mine Flare* tiene una imprimación¹¹ incorporada y un iniciador eléctrico.

11 Imprimación corresponde a una capa de sellante aplicada al dispositivo con la finalidad de aislarlo de la humedad ambiente.



Figura N° 5: "Hyperheat Mine Flare contra T-AB-1 antipersonal (izquierda) y mina antitanque (derecha)".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

3.3. *Propellant Torch System*

El sistema *Propellant Torch System* fue diseñado y desarrollado en Applied Research Associates Inc., y consiste en una formulación de propelente en una carcasa resistente al calor. Una vez encendido, un chorro de producto caliente sale de la boquilla de la antorcha y penetra la carcasa de la mina, lo que inicia una combustión autosuficiente y de bajo orden en la carga explosiva principal de la mina. Existen dos tipos de configuraciones de antorchas para neutralizar minas de carcasa fina y dura. La antorcha para minas de carcasa delgada se designa como PT-3 y la antorcha para minas de carcasa dura se designa como PT-12. La antorcha se coloca en un punto de separación y ángulo apropiados con relación al objetivo, conforme se muestra en Figura N° 6, luego se enciende usando un dispositivo de ignición en la abertura de la antorcha. El dispositivo de ignición consiste en un iniciador eléctrico conectado a un fusible de fósforo insertado en la boquilla de la antorcha. Cuando la antorcha está en un ángulo descendente, se debe tener cuidado para asegurar que la unión rápida no caiga fuera. Este sistema ha demostrado ser efectivo en pruebas preliminares contra artefactos reales (minas y bombas de carcasa metálica) y minas sustitutas revestidas en madera, plástico o hasta 0,5 pulgadas (12,7 mm) de acero.



Figura N° 6: "PT-3 contra mina antitanques SPM-1 y TM-46".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.



3.4. *Pyropak*

El sistema *Pyropak* consiste en una carga de termita de 400 g empaquetada en un material de polipropileno, según se muestra en Figura N° 7, el cual se derrite durante la reacción inicial en pequeñas gotas sólidas sin quemar que exponen el polvo de la termita al objetivo.

La carga de la termita, generalmente, se coloca directamente en la parte superior del objetivo o donde el material del contenedor es el más delgado y está en el punto más alejado del tren detonador, como se muestra en Figura N° 7.

La razón para esto es que el líquido fundido de termita alcanza una temperatura superior a 3.000 °C (5,432 °F), tiene una acción descendente y se quemará más rápido a través de las partes más delgadas del contenedor del explosivo. Luego, la termita alcanza al explosivo y este se quemará a su propio ritmo a una temperatura de 2.000-2.500 °C (3.632-4.532 °F). Para cuando la quema llega al tren de detonación, una gran proporción del explosivo ya ha sido destruido. Si el detonador se inicia, entonces el resultado de la explosión será mucho menor de lo que hubiera sido con la masa explosiva total.

Este compuesto se considera muy seguro, debido a que para iniciarse requerirá una temperatura de la llama de 800-1.200 °C (1.472-2.192°F) o superior y un tiempo de contacto de al menos 3 segundos.



Figura N° 7: “*Pyropak* usada contra T-AB-1 mina antipersonal (izquierda) y mina TMRP-6 antitanque (derecha)”.

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

3.5. *Pyro-Torch System*

General Sciences, Inc. (GSI) desarrolló una antorcha intermetálica¹² llamada *Pyro-Torch*, un sistema que se diseñó en un principio para cortar barras de acero, placas

12 Un compuesto intermetálico es la combinación que resulta de mezclas homogéneas de dos o más metales fundidos.



y tubos. Ahora se está investigando para su uso contra minas terrestres de diversas configuraciones, incluidas las minas AP¹³ plásticas y termoplásticas, grandes minas AT¹⁴ metálicas y de paredes gruesas.

El Sistema *Pyro-Torch* consiste en material energético intermetálico propiedad de GSI en forma de cartucho, el cual es capaz de derretir barras de 0,5 pulgadas (1,27 cm) y planchas de acero en 3-4 segundos. El dispositivo se enciende usando un encendedor *squib* (eléctrico sin llama) y produce una llama intermetálica líquida a alta temperatura capaz de quemarse a través del metal. Para neutralizar minas, el dispositivo del Sistema *Pyro-Torch* se coloca al lado de la mina y se enciende conforme se muestra en Figura N° 8. El cartucho contiene 300 g de material reactivo y se quema durante 10-15 segundos. Una vez que este penetra la mina, quema el material explosivo.



Figura N° 8: "Sistema *Pyro-Torch* contra mina antitanque TM-46".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

3.6. *Thiokol Demining Flare*

El *Thiokol Demining Flare* es un sistema de deflagración de minas creado a partir de excedentes de combustible de cohete. Es un propelente sólido fabricado por Thiokol para el programa *Space Shuttle*.

Como se muestra en la Figura N° 9, *Thiokol Demining Flare* se instala al costado de la mina para luego ser iniciado y proceder a neutralizar las minas quemando rápidamente a través de la carcasa y encendiendo el explosivo principal sin causar una detonación. La temperatura promedio de su llama es superior a 1.927 °C (3.500 °F), con un tiempo de duración de aproximadamente 70 segundos.

13 Mina AP se refiere a mina antipersonal.

14 Mina AT se refiere a mina antitanque.



Figura N° 9: "Thiokol Demining Flare contra mina antitanque TMRP-6".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

4. TIPO DE REACCIÓN USADA EN LOS SISTEMAS DEFLAGRADORES

La química usada en los diferentes sistemas deflagradores vistos anteriormente corresponde a reacciones de óxido, más conocida como Redox,¹⁵ lo que nos da una base de dónde partir para comenzar a evaluar distintos compuestos dependiendo del resultado que se quiera lograr.

4.1. Declaración de la solución

Una vez identificado el problema y analizados los distintos métodos usados en otras partes del mundo, se consideró un estudio para desarrollar un sistema de neutralización que permitiera entregar alta temperatura de manera rápida, que fuera capaz de perforar el contenedor metálico de un artefacto explosivo para, así, alcanzar el explosivo principal y lograr la deflagración de este. De esta forma, permite evitar o disminuir al máximo la generación de daño colateral producido por una detonación, buscando obtener, como resultado, una limpieza rápida y eficiente, sin la generación de una onda expansiva, la cual finalmente es la responsable de los daños causados en las cercanías de una UXO.

Para esto se analizaron diferentes compuestos en cuanto a sus potenciales de oxidación, en forma teórica y mediante pruebas de laboratorio, de manera tal de lograr determinar una reacción química de óxido-reducción capaz de liberar una elevada entrega de energía calorífica en un periodo muy corto de tiempo, alcanzando temperaturas sobre los 2.000 °C que le permitan perforar el contenedor del explosivo, ya sea

¹⁵ Esta es una reacción que se produce con la pérdida formal de electrones de un átomo y su ganancia por otro átomo. Como la ganancia de electrones recibe el nombre de reducción y la pérdida de electrones es una oxidación, el proceso completo se conoce como reacción Redox (Shriver *et al.*, 1997).



plástico o metálico, cuyo espesor deberá ser determinado de acuerdo a experiencias de laboratorio y pruebas posteriores, lo anterior para definir la máxima capacidad de perforación en metal.

4.2. Espesores de artefactos explosivos

Para poder determinar el tipo de material y espesor al que se enfrentaría la reacción, se trabajó en conjunto con la escuela de ingenieros CEDDEX,¹⁶ donde se procedió a tomar medidas de espesor de diferentes municiones y granadas de mortero, así como proyectiles en el predio de Tejas Verdes, conforme se muestra en las Figuras N° 10 a 13.



Figura N° 10: "Munición 106 mm antiblindaje".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 11: "Munición 106 mm HESH".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 12: "Granada de mortero 120 mm".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 13: "Granada de mortero 120 mm".

Fuente: archivo del autor.

16 CEDDEX, Centro de Entrenamiento de Desminado y Destrucción de Explosivos de la Escuela de Ingenieros del Ejército de Chile.



Con la recopilación de datos anteriores, se pudo determinar el rango de espesor de las distintas municiones, las cuales fluctúan entre los 4,47 mm y 12 mm, espesor que deberá ser capaz de perforar la reacción química. Por otra parte, el espesor de las minas AT va desde los 3 a los 4 mm.

A partir de los datos obtenidos mediante las distintas mediciones efectuadas en la Escuela de Ingenieros, se confeccionó la Tabla N° 2, en la que se indica el tipo de artefacto explosivo y su respectivo espesor.

DISPOSITIVO	ESPESOR DE PARED
Granada de mortero 120 FAMA E	12 mm
Munición antiblindaje 106 mm	8,31 mm
Proyectil 106 mm HESH	4,47 mm
Granada de mortero 60 mm	6 mm
Granada de mortero 81	8 mm
Mina AT PRB M3 (plástico)	4 mm
Mina AT M-15	3 mm

Tabla N° 2: "Espesores de dispositivos explosivos".

Fuente: elaboración propia.

5. REQUISITOS FUNCIONALES

Los requisitos funcionales para el prototipo se basaron en los procedimientos de neutralización por deflagración, especificados en la "General disposal methods for EOD",¹⁷ la cual muestra y estipula los diferentes métodos y procedimientos para la neutralización de un artefacto explosivo.

De las seis opciones principales para la eliminación de UXOs, la presente investigación se enfocó en las técnicas de bajo orden (técnicas por corte o deflagración), específicamente, la técnica mediante un proceso de deflagración, ya que en esta no existe una transferencia de energía cinética desde el prototipo hacia el artefacto explosivo a neutralizar, lo que conlleva evitar al máximo la detonación, buscando quemar el explosivo principal a fin de evitar un daño colateral en las cercanías de la población civil o en alguna infraestructura.

¹⁷ General Disposal Methods for EOD (en español, métodos generales de eliminación), disposiciones que regulan los métodos y maneras de neutralización de un artefacto explosivo.



5.1. Requisitos de la reacción

Los siguientes son los procedimientos y métodos de los cuales se ha hecho uso, tanto para trabajos de manera teórica como para los llevados a laboratorio, y, de esta manera, comprobar de forma empírica sus efectos.

5.1.1. Entalpía de reacción

La entalpía de una reacción química donde es el calor absorbido o desprendido en dicha reacción cuando esta transcurre a presión constante, es decir:

Cálculo de Entalpía de Reacción (ΔH_r)^{18, 19, 20}

$$\Delta H_r = \sum \Delta H_f^0 (\text{productos}) - \sum \Delta H_f^0 (\text{materias energéticas})$$
$$\Delta H = Q_p$$

5.1.2. Poder de perforación

Se entenderá por el poder o capacidad de la reacción química a utilizar en función de su capacidad de atravesar una placa metálica de un determinado espesor.

5.1.3. Estabilidad química

Según lo norma de la RAI,²¹ la estabilidad termodinámica ocurre cuando un sistema está en su estado más bajo de energía o en equilibrio químico con su ambiente.

6. ENTORNO DE TRABAJO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Esta investigación trabajó, en primera instancia, en un ambiente de laboratorio proporcionado por la ACAPOMIL, donde se analizaron diferentes elementos para formar reacciones químicas de acuerdo con sus diferencias entre sus potenciales de oxidación y entalpías de reacción, a fin de determinar, de manera teórica y práctica, que, para que esta óxido-reducción ocurriera, se necesitaba un combustible y un agente oxidante, es decir, un reductor y un oxidante que cumpliera con lo siguiente:

18 ΔH_f^0 , abreviación para entalpía (calor) de formación estándar (J/mol).

19 ΔH , abreviación para entalpía (calor) de reacción (J/mol).

20 Q_p , calor transferido a presión constante.

21 RAI, Real Academia de Ingeniería.



- elementos que, al ser mezclados, no reaccionen entre sí de manera espontánea;
- que permitan sobrepasar la temperatura de fusión hierro en estado puro, ya que, con esto, se simulan las peores condiciones para un contenedor de cualquier explosivo, debido a que la temperatura de fusión del hierro es superior a la de cualquier acero; y que
- los materiales o reactivos a ocupar se encuentren en el comercio nacional y puedan ser adquiridos por el investigador y la industria posteriormente para el desarrollo de las pruebas.

Derivado de lo anterior, se usó como combustible el aluminio microparticulado, debido a su abundancia, facilidad de empleo, seguridad de almacenaje y transporte, además de que presenta una capa de pasivación que lo hace inerte al medio, así como por su potencial de oxidación. Una vez determinado el combustible o agente reductor, se determinó el agente oxidante, para lo cual se evaluaron, de manera teórica, a través de sus diferencias de potenciales de oxidación, así como de sus entalpías de reacción, elementos tales como el óxido cúprico, óxido de magnesio, óxido de hierro III y IV.

6.1. Reactivos y afinidad electroquímica

Para generar una reacción de alta temperatura, se analizaron y determinaron reactivos de manera teórica que permitieran generar una óxido-reducción mediante sus diferencias de potenciales de oxidación. Esta óxido-reducción tenía que ser capaz de generar una temperatura tal, que permitiera sobrepasar el punto de fusión del acero, para, de esta forma, perforar el contenedor de un explosivo y producir su posterior deflagración.

6.2. Formulación de la reacción de óxido-reducción

Esta es una reacción que se produce con la pérdida formal de electrones de un átomo y su ganancia por otro átomo. Como la ganancia de electrones recibe el nombre de reducción y la pérdida de electrones es una oxidación, el proceso completo se conoce como reacción Redox (Shriver, 1997).

Dentro de las reacciones Redox existe un grupo importante de oxidantes, estos son los óxidos metálicos con los metales llamados reacciones térmicas. La producción de energía de esta reacción dependerá de los calores de formación de los óxidos (ΔH). Por lo tanto, el calor de la reacción (ΔH^-) es la diferencia del calor de formación de estos (Murray, 1989).

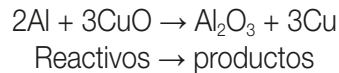


Luego, mediante análisis teórico y, posteriormente, mediante la ejecución de trabajos en pruebas de laboratorio, se determinaron, de manera empírica, los elementos químicos a utilizar en la reacción. Lo anterior condujo a tres posibles reacciones, de las cuales se desprenden sus entalpías de reacción de acuerdo a lo siguiente (Orbovic, 2011):

Cálculo de Entalpía de Reacción (ΔH_r)^{22, 23}

$$\Delta H_r = \sum \Delta H_f^0(\text{productos}) - \sum \Delta H_f^0(\text{materias energéticas})$$
$$\Delta H = Q_p$$

6.2.1. Reacción entre aluminio y óxido de hierro II



Entalpías

Al	=	0 kJ/mol
CuO	=	-157,30 kJ/mol
Al ₂ O ₃	=	-1675,70 kJ/mol
Cu	=	0 kJ/mol

Peso atómico

Al	=	26,98 g/mol
Cu	=	63,54 g/mol
O	=	16 g/mol

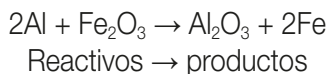
- Entalpía
 $0 \text{ kJ/mol} + 1 \text{ mol} \times (-1675,70 \text{ kJ/mol}) - 3 \text{ mol} \times (-157,30 \text{ kJ/mol}) - 0 \text{ kJ/mol} = -1203,8 \text{ kJ}$
- Cálculo de la masa (a través de su peso atómico)
 $2 \text{ mol} \times 26,98 \text{ g/mol} + 3 \text{ mol} \times 63,54 \text{ g/mol} + 3 \text{ mol} \times 16 \text{ g/mol} = 292,58 \text{ g}$
- Entalpía de reacción
 $\Delta H_r = -1203,8 \text{ kJ}$ por 292,6 g de compuesto (-4,114 kJ/g)

²² ΔH , abreviación para entalpía (calor) de reacción (J/mol).

²³ Q_p , calor transferido a presión constante.



6.2.2. Reacción entre aluminio y óxido de hierro III



Entalpías

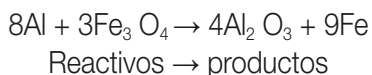
Al	=	0 kJ/mol
Fe ₂ O ₃	=	- 824,20 kJ/mol
Al ₂ O ₃	=	-1675,70 kJ/mol
Fe	=	0 kJ/mol

Peso atómico

Al	=	26,98 g/mol
Fe	=	55,847 g/mol
O	=	16 g/mol

- Entalpía
 $0 \text{ kJ/mol} + 1 \text{ mol} \times (-1675,70 \text{ kJ/mol}) - 1 \text{ mol} \times (-824,20 \text{ kJ/mol}) - 0 \text{ kJ/mol} = -851,5 \text{ kJ}$
- Cálculo de masa (a través de su peso atómico)
 $2 \text{ mol} \times 26,98 \text{ g/mol} + 2 \text{ mol} \times 55,847 \text{ g/mol} + 3 \text{ mol} \times 16 \text{ g/mol} = 213,65 \text{ g}$
- Entalpía de reacción
 $\Delta H_r = -851,5 \text{ kJ}$ por 213,65 g de compuesto (-3,985 kJ/g)

6.2.3. Reacción entre aluminio y óxido de hierro IV



Entalpías

Al	=	0 kJ/mol
Fe ₃ O ₄	=	-1118,4 kJ/mol
Al ₂ O ₃	=	-1675,70 kJ/mol
Fe	=	0 kJ/mol

Peso atómico

Al	=	26,98 g/mol
Fe	=	55,847 g/mol
O	=	16 g/mol



- Entalpía
 $0 \text{ kJ/mol} + 4 \text{ mol} \times (-1675,70 \text{ kJ/mol}) - 3 \text{ mol} \times (-1118,4 \text{ kJ/mol}) - 0 \text{ kJ/mol} = -3347,60 \text{ kJ}$
- Peso atómico
 $8 \text{ mol} \times 26,98 \text{ g/mol} + 9 \text{ mol} \times 55,847 \text{ g/mol} + 12 \times 16 \text{ g/mol} = 910,46 \text{ g}$
- Entalpía de reacción
 $\Delta H = -3347,60 \text{ kJ}$ por 910,46 g de compuesto (-3,677 kJ/gr)

Cabe considerar que la Ley de Hess establece que la entalpía de formación de los elementos en estado normal es nula.

Una vez obtenidos los datos de manera teórica, se procedió a llevar las reacciones a ensayos de laboratorio a fin de comprobar de manera empírica el poder calorífico en cuanto a su capacidad de generar una reacción exotérmica y determinar qué reacción era la más adecuada para continuar con el estudio.

7. ENSAYO EXPERIMENTAL

El objetivo de los siguientes ensayos fue determinar, a través de un método experimental, qué reacción poseía una mayor capacidad de generar liberación de energía calorífica (temperatura). Para esto, se procedió a masar pequeñas muestras, siempre en su correspondiente equilibrio estequiométrico, a fin de obtener el máximo rendimiento de la reacción.

De esta forma, se llevaron muestras de 6 g de los compuestos antes mencionados a un crisol de hierro fundido donde se inició la reacción a fin de verificar si:

- Sucede la reacción liberando energía calorífica.
- Es capaz de calentar el crisol.
- Es sostenida y no violenta (explosiva).

7.1. Aluminio y óxido de cobre II ($2\text{Al} + 3\text{CuO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Cu}$)

Los resultados obtenidos son negativos, ya que, si bien la reacción ocurre, esta es demasiado violenta, generando una sublimación²⁴ inmediata del compuesto una vez iniciada (Figura N° 14). Esto ocasionó que no hubiera una transferencia térmica desde la

²⁴ Cambio directo de estado sólido a gas, sin pasar por fase líquida.



reacción hacia el crisol, por lo que no existió una evidencia física de la energía calorífica entregada por esta, conforme se muestra en Figura N° 15.



Figura N° 14: "Inicio de la reacción".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 15: "Resultado de la reacción".

Fuente: archivo del autor.

7.2. Aluminio y óxido de hierro III ($2\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}$)

Los resultados obtenidos son positivos, ya que la reacción ocurre y es sostenida por un periodo (Figura N° 16), lo cual permitió una transferencia térmica desde el compuesto hacia las paredes del contenedor, el que adquirió un color entre blanco y amarillo (Figura N° 17).



Figura N° 16: "Inicio de la reacción".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 17: "Resultado de la reacción".

Fuente: archivo del autor.

7.3. Aluminio y óxido de hierro IV ($8\text{Al} + 3\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 4\text{Al}_2\text{O}_3 + 9\text{Fe}$)

Los resultados obtenidos son positivos, puesto que la reacción ocurre y es sostenida por un periodo, lo que permitió una transferencia térmica desde el compuesto hacia las paredes del contenedor, el cual adquirió un color entre amarillo pálido y anaranjado (Figuras N° 18 y 19).



Figura N° 18: "Inicio de la reacción".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 19: "Resultado de la reacción".

Fuente: archivo del autor.

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De los resultados obtenidos usando ambos tipos de óxido de hierro (III y IV) como agente oxidante y aluminio como reductor (combustible), se puede apreciar, utilizando la guía de temperatura para forjado y templado, que, mediante estas dos reacciones, la temperatura alcanzada fluctuó entre los 1.200 °C para el óxido de hierro III y 980 °C para el óxido de hierro IV, considerando que se utilizó 6 g de óxido de hierro III y 6,44 g de óxido de hierro IV para realizar la prueba.

Con los resultados obtenidos anteriormente, se determinó realizar pruebas de laboratorio con probetas de 150 g de compuesto, utilizando las reacciones de óxido hierro III y IV al ser estas las de mayor liberación de energía y las más estables durante la reacción, con la finalidad de determinar cuál de estas reacciones será la de mayor liberación de energía y capaz de perforar las probetas metálicas.

8.1. Primera prueba de perforación

El objetivo de la presente prueba fue determinar, de manera experimental, si la reacción química era capaz de perforar metal, para lo cual se diseñó un contenedor cilíndrico metálico conforme se detalla en la descripción de las pruebas.

8.1.1. Descripción de la prueba

Probeta con aluminio y óxido de hierro IV ($8Al + 3Fe_3O_4 \rightarrow 4Al_2O_3 + 9Fe$) con 152 g de compuesto, bajo relación estequiométrica.

Para realizar la prueba, se confeccionaron contenedores cilíndricos de hierro de 200 mm (largo) x 60 mm (diámetro) y una base de 5 mm de espesor como se muestra en la Figura N° 22. Con esto listo, se procedió al masado de 152 g de compuesto, como se muestra en las Figuras N° 20 y 21, y posterior iniciación de la reacción (Figura N°



23), de lo que se obtuvo como resultado una reacción de alta temperatura y capaz de calentar el metal, llevándolo casi hasta su punto de fusión, no siendo capaz de lograr la perforación de la base, conforme se muestra en las Figuras N° 24 y 25.

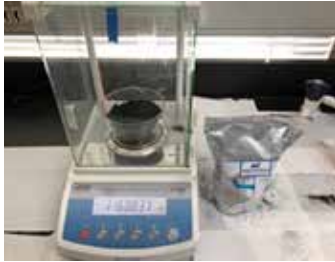


Figura N° 20: "Masado de óxido de hierro IV".

Fuente: archivo del autor.

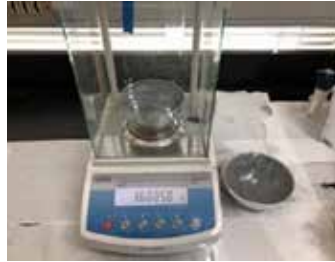


Figura N° 21: "Masado de polvo de aluminio".

Fuente: archivo del autor.

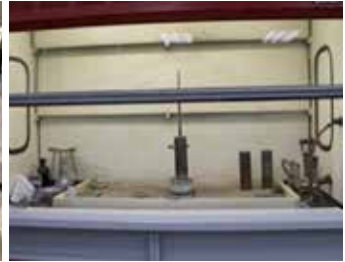


Figura N° 22: "Prueba sobre probeta cilíndrica de base de 5 mm de espesor (hierro)".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 23: "Reacción de óxido-reducción".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 24: "Calor transferido hacia la base".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 25: "Deslaminaciones sufridas por la probeta".

Fuente: archivo del autor.

8.2. Segunda prueba de perforación

Probeta con aluminio y óxido de hierro III ($2Al + Fe_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe$) 142,5 g de compuesto, bajo relación estequiométrica.

El objetivo de la presente prueba fue determinar, de manera experimental, si la reacción química fue capaz de perforar metal, para lo cual se diseñó un contenedor cilíndrico metálico conforme se detalla a continuación.

8.2.1. Descripción de la prueba

Para llevarla a cabo, se confeccionaron contenedores cilíndricos de hierro de 200 mm (largo) x 60 mm (diámetro) y una base de 5 mm de espesor. Luego se procedió al



masado de 142,5 g (Figuras N° 26 y 27) de compuesto y posterior iniciación de la reacción (Figura N° 28), de lo que se obtuvo como resultado una reacción de alta temperatura, la cual, debido a su alto poder calorífico y rápida transferencia de calor, logró perforar la base de 5 mm de hierro (Figuras N° 29 y 30).

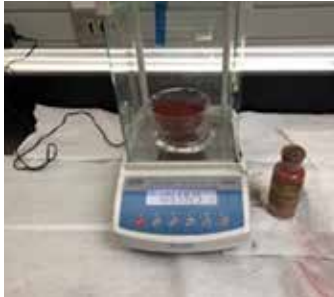


Figura N° 26: “Masado de óxido de hierro III”.

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 27: “Masado de polvo de aluminio”.

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 28: “Probeta metálica de 5 mm de espesor”.

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 29: “Perforación de la probeta en su base y medición de temperatura”.

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 30: “Vista de la base perforada”.

Fuente: archivo del autor.

8.3. Medición de temperatura alcanzada por la reacción

Dentro de las interrogantes que surgieron luego de realizadas las experiencias de laboratorio, se encontró al medir la temperatura alcanzada por la reacción en su fase líquida. Si bien se tenía un estimativo, considerando que el óxido de hierro funde a los 1.565 °C, se sabía que estaba por sobre esta temperatura.

Para responder la incógnita anterior, se procedió a medir la temperatura mediante un sensor IR²⁵ y su función “data log”²⁶ en el laboratorio de la ACAPOMIL, el cual

²⁵ IR, sigla del inglés, en español: infrarrojo (radiación del espectro luminoso).

²⁶ Data log, en español: registro de datos.



arrojó una tabla de datos, con los que se confeccionó el gráfico que se muestra en la Figura N° 31.

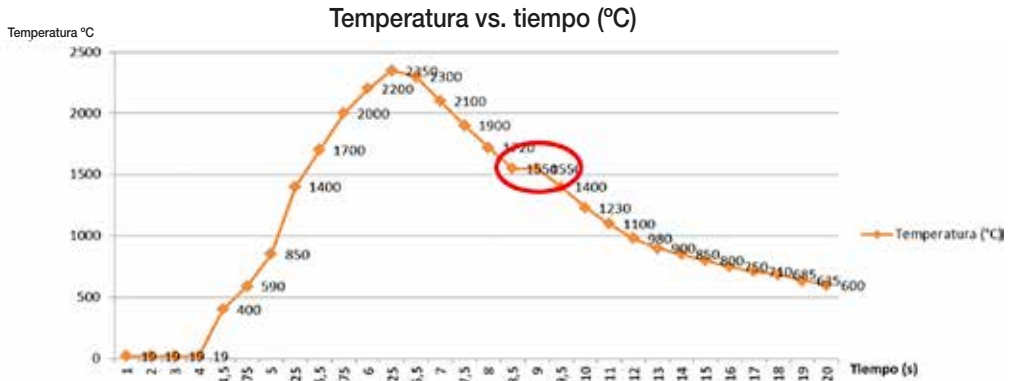


Figura N° 31: "Gráfico de temperatura versus tiempo".

Fuente: elaboración propia.

En el gráfico anterior se puede evidenciar la máxima temperatura alcanzada por la reacción en su fase líquida y el tiempo que esta demora. También se puede apreciar el cambio de fase líquido-sólido, ya que, a la temperatura de 1.550 °C, se aprecia una línea horizontal que se mantiene constante por un periodo (encerrada en rojo, Figura N° 31), lo que indica el cambio de fase de la composición.

8.4. Construcción del crisol de prueba

Para medir la resistencia térmica y los daños que pueda causar la reacción, debido a su alta temperatura, se llevó a cabo la construcción de dos contenedores tipo crisol, el primero de cemento refractario y el segundo con cemento normal (cuyas propiedades se muestran en Tabla N° 3). A estos se les vació 200 g de compuesto. Posteriormente, se inició la reacción, como se muestra en las Figuras N° 32 y 33. Una vez terminada la reacción, se procedió a medir la temperatura externa e interna alcanzada por los crisoles (Figuras N° 34 a 37). Luego, se procedió a comparar ambos aislantes, lo que queda reflejado en la Tabla N° 4.

N°	TIPO DE CEMENTO	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
1	Cemento refractario Llama	0,15 W/(m °C)
2	Cemento normal de construcción (Melón)	0,8 W/(m °C)

Tabla N° 3: "Propiedades de materiales aislantes".

Fuente: Serway y Jewett, 2004.



Figura N° 32: "Prueba realizada a ambos crisoles".
Fuente: archivo del autor.

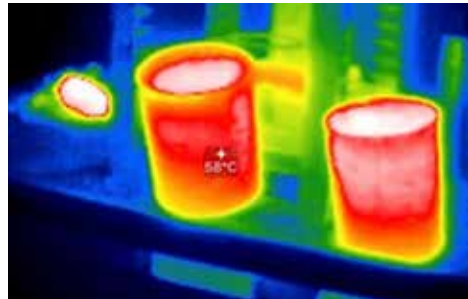


Figura N° 33: "Imagen térmica de ambos crisoles".
Fuente: archivo del autor.



Figura N° 34: "Temperatura exterior del crisol de cemento refractario".
Fuente: archivo del autor.



Figura N° 35: "Temperatura exterior del crisol de cemento normal".
Fuente: archivo del autor.



Figura N° 36: "Temperatura dentro del crisol con aislante refractario, luego de ocurrida la reacción".
Fuente: archivo del autor.



Figura N° 37: "Temperatura del crisol con aislante normal, luego de ocurrida la reacción".
Fuente: archivo del autor.



Nº	TIPO DE CEMENTO	PRUEBA EFECTUADA	TEMPERATURA (°C) EXT. MEDIDA LUEGO DE 1 MIN.
1	Cemento refractario Llaima	200 g de compuesto	33,9 °C
2	Cemento normal (Melón)	200 g de compuesto	86,8 °C

Tabla N° 4: "Resultados obtenidos".

Fuente: elaboración propia.

Como conclusión, se determinó utilizar el refractario Llaima como material aislante, dado que es el que menos presenta pérdida de calor hacia el exterior, lo que permite un mejor desempeño de la reacción.

8.5. Planos preliminares

El diseño preliminar se basó en las experiencias realizadas y los datos obtenidos en laboratorio, con los cuales se llegó a dos evaluaciones de prototipos. El primero de ellos mediante el uso de la fase líquida de la reacción química vertida sobre la UXO y, el segundo, usando los gases producidos por la combustión dirigidos hacia el artefacto a deflagrar. Para poder realizar esto, se trabajó con expertos de la planta de I2D de FAMAE.

El diseño de detalle se trabajó mediante diseño computacional (software inventor), junto a la gerencia de I2D de FAMAE (Figura N° 38).

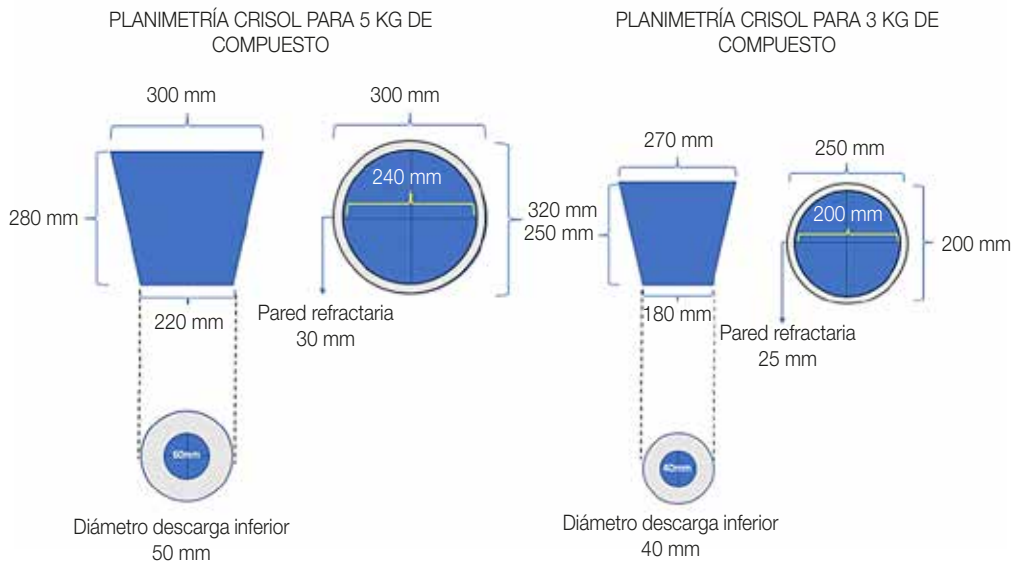


Figura N° 38: "Planimetría de detalle crisol 3 y 5 kg respectivamente".

Fuente: elaboración propia.



9. PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Para validar la solución, se llevaron a cabo pruebas que determinaron el poder de perforación en placas metálicas y deflagración de explosivo, mediante un plan y protocolo de pruebas.

9.1. Perforación de placas

Para medir la capacidad de perforación en metal, se diseñó una torre de placas metálicas (placas de hierro de 2 mm, punto de fusión de 1.600 °C) (Figura N° 39), sobre la cual se instaló el crisol con compuesto a fin de dar inicio a la reacción. Esta, a su vez, por gravedad decantó sobre las placas y comenzó a perforarlas. Entre placa y placa se colocó explosivo (pentolita), proporcionado por FAMA E, a fin de comprobar, de manera empírica, si este deflagraba o detonaba producto de la elevada temperatura de la reacción. Es importante destacar que se escogió este tipo de placas por ser el único espesor disponible en el mercado en ese momento.

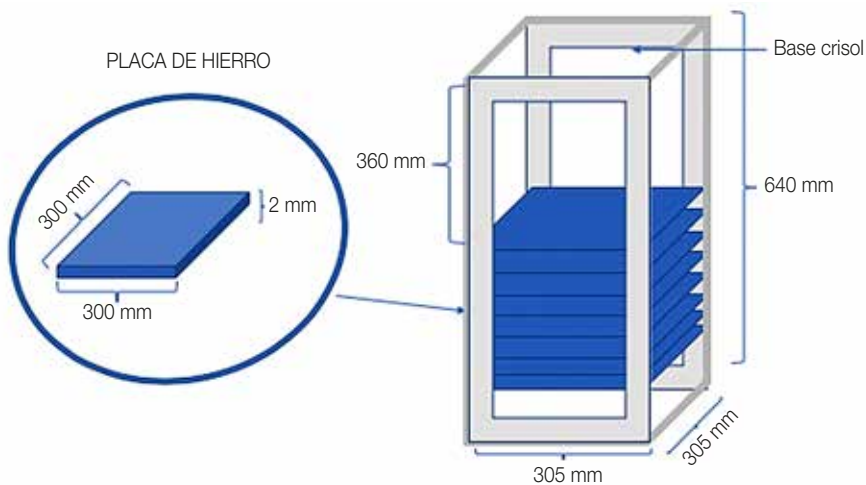


Figura N° 39: "Torre de perforación de placas".

Fuente: elaboración propia.

9.2. Perforación del cilindro

Para simular una UXO de geometría cilíndrica de 6 mm de espesor (Figura N° 40), se utilizó un cilindro al cual, mediante una válvula, se le introdujo aire comprimido a una presión a 35 psi (241 kPa), con la finalidad de asemejar en parte la presión producida por la deflagración interna del explosivo principal al momento de sus cambios de fases de sólido → líquido → vapor.

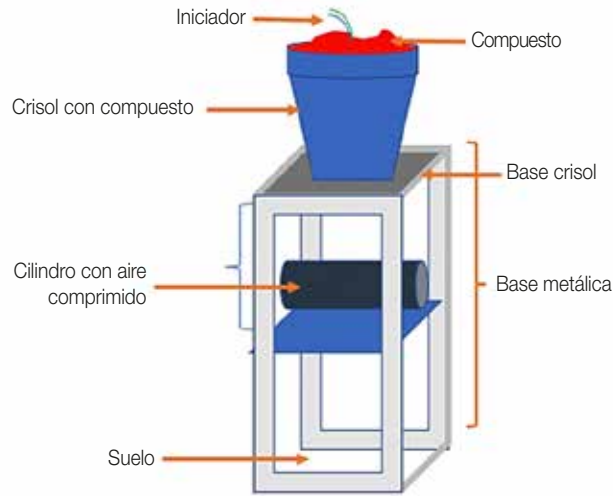


Figura N° 40: "Diagrama de la prueba de perforación de un cilindro metálico de 6 mm de espesor".

Fuente: elaboración propia.

9.2.1. Ejecución de las pruebas para crisol

Para ejecutar las pruebas, el trabajo se dividió en tres fases: el mezclado, homogenizado y masado de los reactivos; el llenado de los contenedores; y la introducción del explosivo (pentolita) entre las placas para activar los compuestos y medir su poder de perforación, junto con la deflagración del explosivo.

9.2.2. Primera fase

Mediante el uso de mezcladores automáticos, se procedió al homogenizado de los reactivos, como se muestra en las Figuras N° 41 a 43.



Figura N° 41: "Introducción de elementos reactivos en el mezclador".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 42: "Óxido de hierro III y aluminio en el mezclador".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 43: "Inicio del proceso de homogenizado mediante rotación automática del mezclador".

Fuente: archivo del autor.



9.2.3. Segunda fase

Con la mezcla ya masada anteriormente (Figura N° 44), se procedió a llenar el primer contenedor de la prueba, para lo cual se situó el crisol sobre la torre de placas y se procedió a su llenado (3 kg), de acuerdo con el protocolo de pruebas (Figura N° 45).



Figura N° 44: "Mezcla masada".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 45: "Llenado de crisol".

Fuente: archivo del autor.

9.2.4. Tercera Fase

En esta fase, se colocó la pentolita entre las placas (Figura N° 46) y el iniciador dentro del crisol (Figura N° 47), con lo que se dio inicio a la prueba desde la sala de control.



Figura N° 46: "Introducción de pentolita entre las placas".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 47: "Crisol con el sistema de ignición instalado".

Fuente: archivo del autor.

10. RESULTADO OBTENIDO

El resultado obtenido fue una combustión sostenida de 20 segundos, donde se obtuvo una reacción de alta temperatura, la cual, debido a sus compuestos, generó



hierro en estado líquido, el que, por medio de la gravedad, comenzó a descender, perforando 3 placas metálicas, de 2 mm cada una, situadas bajo él, y deflagrando el explosivo situado entre ellas. Lo anterior se pudo apreciar en las secuencias fotográficas de las Figuras N° 48 y 49.



Figura N° 48: "Secuencia fotográfica de la prueba de perforación, se aprecia como el hierro líquido perfora las placas y deflagra el explosivo".

Fuente: elaboración propia.



Figura N° 49: "Daño causado por la reacción a las placas".

Fuente: elaboración propia

11. PRUEBA DE VALIDACIÓN

Para validar el dispositivo deflagrador, se diseñó una prueba conforme a las siguientes fases.

11.1. Primera Fase

La primera fase consistió en el masado y homogenizado para un dispositivo de 3 kg de compuesto.



11.1.1. Segunda fase

En esta fase se introdujo aire comprimido a la UXO a escala (35 psi / 241kPa), para simular, en parte, la presión generada por los gases al momento de la deflagración del explosivo principal como se muestra en la Figura N° 50. Seguido de esto, se la situó debajo del crisol a una separación de 150 mm (Figura N° 51).



Figura N° 50: "UXO simulada de 5 mm de espesor".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 51: "UXO simulada situada bajo el crisol".

Fuente: archivo del autor.

11.2. Resultado de la prueba

El resultado de la prueba se consideró exitoso, ya que se logró una combustión sostenida y no explosiva, lo que permite la obtención de hierro líquido (Figura N° 52), el cual, producto de la fuerza de gravedad, cayó sobre la UXO a escala y lo perforó (Figura N° 53), lo que, finalmente, permitió validar la reacción y el dispositivo deflagrador de artefactos explosivos para UXOs de espesor de hasta 6 mm.



Figura N° 52: "Hierro líquido sobre la UXO a escala".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 53: "Daño causado a la UXO simulada".

Fuente: archivo del autor.



12. CONCLUSIONES

Durante el presente trabajo, se pudo evidenciar que existe una falta de capacidad institucional al no contar con un medio que permita realizar una deflagración sin detonación ni explosión. Lo anterior permitió el desarrollo de este trabajo en función de generar una reacción química de alta temperatura que permita perforar metal y deflagrar explosivo.

Gracias al aporte de la Escuela de Ingenieros del Ejército, se pudo determinar los requerimientos que el dispositivo debe cumplir. Por otra parte, se pudo medir de manera empírica los diferentes espesores de UXOs y, así, determinar el tipo de artefacto sobre el cual puede trabajar el dispositivo.

Además, se logró, de manera experimental, determinar una reacción química de óxido-reducción, la cual fue capaz de entregar una elevada temperatura que permitió fundir y perforar metal, quedando demostrado en las pruebas de perforación de placas metálicas.

A su vez, se pudo comprobar la teoría de los resultados obtenidos en laboratorio sobre la reacción, en cuanto a su capacidad de perforación y deflagración de explosivo, lo que quedó demostrado en las diferentes pruebas realizadas en terrenos de FAMA E.

Por otra parte, se considera que se debe seguir investigando para aprovechar los datos obtenidos durante la presente investigación, a partir de la cual se logra determinar las propiedades de los compuestos a utilizar, así como los diseños realizados, los que quedaron establecidos en los protocolos y planes de prueba efectuados. Todo lo anterior servirá para aportar a la Institución con un mecanismo más, el cual irá en directo apoyo a las unidades de ingenieros del Ejército. Lo anterior permitirá lograr un bajo orden al momento de neutralizar un artefacto explosivo en lugares donde exista la generación de un posible daño colateral producto de una detonación.

Por último, las pruebas realizadas tanto en el laboratorio de la Academia Politécnica Militar así como las efectuadas en FAMA E, sirvieron de base para diseñar el prototipo deflagrador de artefactos explosivos, para lo cual se hace necesario realizar pruebas sobre artefactos explosivos reales a fin de comprobar de manera veraz el real funcionamiento de la composición y desempeño del prototipo.

BIBLIOGRAFÍA

Academia Politécnica Militar (2015). *Manual de Memorias, Tesis o Actividad Equivalente*. Santiago, Chile: Academia Politécnica Militar.



Comisión Nacional de Desarrollo Humanitario (2018). *Problemática de las minas A.P.* Recuperado de: <http://www.cnad.cl/sitio/educacion%20y%20prevencion/approb.htm>.

División Educación (2011). *Guía para la redacción de citas bibliográficas*. Santiago, Chile: División Educación.

Institute for Defense Analyses (2005). *Operational Evaluation Test of Mine Neutralization Systems*. Alexandria, Estados Unidos: Institute for Defense Analyses.

Shriver, D., Atkins, P. y Langford, C. (1997). *Química Inorgánica*. Barcelona, España: Reverté.

Serway, R. y Jewett, J. (2004). *Physics for scientists and engineers*. California, Estados Unidos: Thomson Brooks/Cole.

Macdonald, J. (1 de septiembre de 2001). *Assessing Sites Contaminated with Unexploded Ordnance: Statistical Modeling of Ordnance Spatial Distribution*. *Environmental Science&Technology*. 35(17), 372A-376A.

Murray, A. B. (1989). *Explosives, propellants & pyrotechnics*. Londres, Reino Unido: Brassey's.

Orbovic, N. B. (2011). *Explosivos propelentes y pirotecnia*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.

Ejército de Chile (2015). *Procedimientos EOD*. Santiago, Chile: Ejército de Chile.

Real Academia Española (2016). *Real Academia Española*. Recuperado de: <http://www.rae.es>

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**EVALUACIÓN DE UN NUEVO PROPELENTE DERIVADO
DEL PERCLORATO DE AMONIO, MODIFICADO CON
DERIVADOS DE FERROCENO, Y SU POTENCIAL
APLICACIÓN EN COHETERÍA EN EL EJÉRCITO**

MAY. ÁNGEL NORAMBUENA PINTO



EVALUACIÓN DE UN NUEVO PROPELENTE DERIVADO DEL PERCLORATO DE AMONIO, MODIFICADO CON DERIVADOS DE FERROCENO, Y SU POTENCIAL APLICACIÓN EN COHETERÍA EN EL EJÉRCITO

MAY. Ángel Norambuena Pinto¹

Resumen: en el presente trabajo se describe el efecto de catalizadores derivados de ferroceno sobre propelentes de tipo composita, utilizados como combustibles en motores de cohetes. Además, se describen las pruebas realizadas en el laboratorio químico del Instituto de Investigaciones y Control del Ejército (IDIC), donde se obtuvieron resultados de la actividad catalítica de derivados de ferroceno sobre la descomposición térmica del perclorato de amonio (PA) a diferentes concentraciones en peso. Posteriormente se seleccionó el aditivo que presentó la menor temperatura de descomposición con PA en una mezcla de concentración 4% en peso y se realizaron pruebas de nivel industrial, en la Planta de Cohetes y Misiles de las Fábricas y Maestranzas del Ejército (FAMAE), para determinar la efectividad del catalizador derivado de ferroceno frente a la velocidad de quemado del propelente tipo composita, que se comparó con óxido férrico como catalizador. Las pruebas fueron desarrolladas en el banco de quemado estático en dependencias de FAMAE.

Palabras clave: catalizadores, aditivos, compositas, propelentes, ferroceno.

Abstract: the present paper describes the effect of ferrocene-derived catalysts on solid composite propellants, such as fuels in rocket engines. Also, the tests are described in the Institute of Investigations and Control of the Army's (IDIC) chemical laboratory, where the results of the catalytic activity of ferrocenes on the thermal decomposition of

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, con mención en Municiones, Propelentes y Explosivos.



ammonium perchlorate (AP) to different percentages in weight were obtained. Subsequently, the product that was presented in the 4% by weight concentration mixture was selected and the industrial level tests were carried out in the Rocket and Missile Plant of the Army Factory and Arsenals (FAMAE), to determine the effectiveness of the ferrocene-derived catalyst against the burning rate of the composite solid propellant and compared with ferric oxide as a catalyst. The tests were developed in the static fire bank in FAMAE offices.

Keywords: *catalysts, additives, composites, propellants, ferrocene.*

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales energéticos son clasificados, entre otras propiedades, sobre la base de su energía y velocidad de descomposición. Es así que todo material químico, cuya energía liberada durante la combustión sea superior a 500 J/g, es considerado un material energético. Por otra parte, si la velocidad de combustión ocurre a kilómetros por segundo, es considerado un explosivo. En el caso de los propelentes y pirotécnicos, su velocidad de combustión ocurre alrededor de los 40 milímetros por segundo y esta energía liberada es utilizada para realizar trabajo útil como impulsar proyectiles, cohetes o fuegos artificiales.

Los bajos explosivos o propelentes también son clasificados sobre la base de su naturaleza, como se indica en la Figura N° 1:

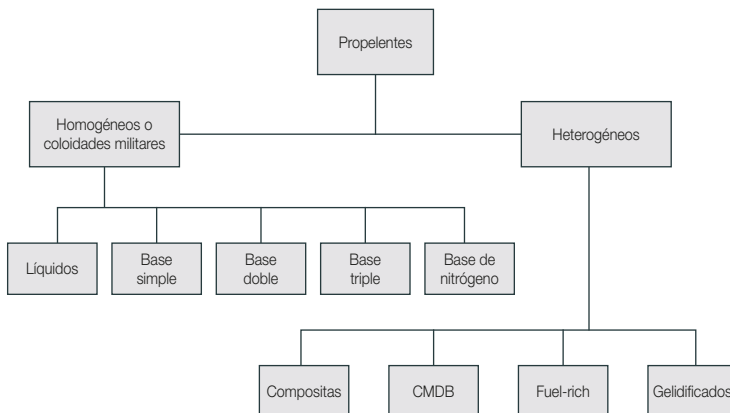


Figura N° 1: "Clasificación de propelentes en base a su naturaleza química".

Fuente: Orbovic, 2011.

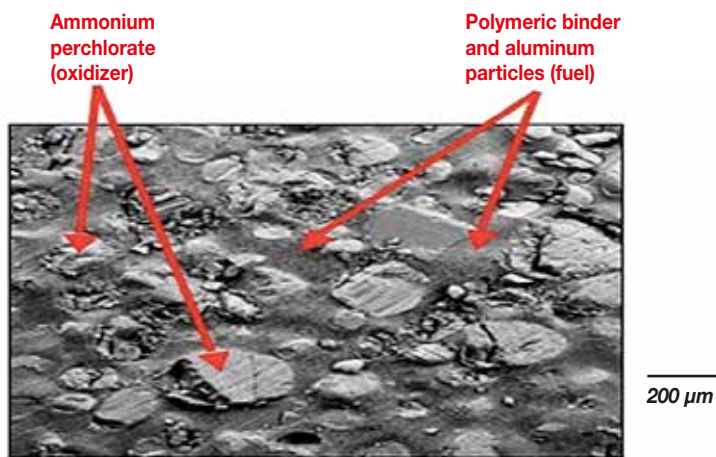
Como se aprecia en la Figura N° 1, los materiales energéticos son variados y han ayudado enormemente al desarrollo de la civilización en tiempos de paz o guerra.



Los propelentes sólidos son preferidos a los líquidos por presentar un mayor tiempo de estabilidad durante el almacenamiento y operativamente son más simples en diseño, por lo que el costo de su mantenimiento es menor. Sin embargo, no están carentes de inconvenientes, tales como autoinflamación, cambios en el régimen de quemado, aumento de presión durante el vuelo.

En el caso particular de este estudio, los propelentes heterogéneos de tipo sólidos compuestos, más conocidos como composita, son de gran interés, porque son los que principalmente se utilizan como motores de cohetes de uso civil y militar. Basándose en su naturaleza, están compuestos de una matriz polimérica, un agente curante, combustible, oxidante y modificadores de la combustión entre otros aditivos. En estos propelentes, el oxidante y el combustible son mezclados físicamente entre ellos, pero no se crean enlaces químicos. La mezcla, generalmente, consta de cristales de oxidante (sales derivadas de perclorato) y un combustible en polvo (usualmente aluminio), los que se mantienen unidos en una matriz de un caucho sintético (o de plástico) que funciona como aglutinante, tal como el polibutadieno. Para fabricar un propelente sólido heterogéneo, se vierten los componentes sólidos (cristales de perclorato de amonio, polvo de aluminio), con un líquido de polibutadieno, se acelera el endurecimiento agregando una pequeña cantidad de agente de curado al polímero aglutinante líquido y se introduce la mezcla en un horno para controlar la temperatura de endurecimiento.

La Figura N° 2 muestra una microfotografía de propelentes de tipo composita, donde se aprecia cómo el oxidante y combustible están insertos en la matriz polimérica de polibutadieno.



Micrograph of solid propellant

Figura N° 2: "Microfotografía de un propelente de tipo composita".

Fuente: Prakash, 2010.



La siguiente tabla muestra los ingredientes más utilizados en la fabricación de propelentes para motores de cohetes:

TIPO DE INGREDIENTE	SIGLA	EJEMPLOS
Oxidante	AP	Perclorato de amonio
	AN	Nitrato de amonio
	NP	Perclorato de nitronio
	KP	Perclorato de potasio
	RDX	Octogeno
	HMX	Hexógeno
Aglutinante	PBAN	Acrlonitrilo polibutadieno
	CTPB	Polibutadieno terminado el carbonilo
	HTPB	Polibutadieno terminado en hidroxilo
Agentes de curado o reticulantes	PQD	Dioxina paraquinona
	TDI	Tolueno 2,4 diisocianato
	MAPO	Tris (1(2 metil) aziridinilo) óxido de fosfina
	IPDI	Diisocianato de isoforona
Plastificante	DOA	Adipato de dioctilo
	IDP	Isodecil pelargonato
	DOP	Ftalato de diocilo
Catalizador	Fe ₂ O ₃	Óxido férrico
	FeO(OH)	Óxido férrico hidrato
	nBF	n-butilferroceno
Metal combustible	Al	Aluminio
Supresor de inestabilidad en la combustión	Al	Aluminio
	Zr	Circonio
	ZrC	Carburo de circonio

Tabla N° 1: "Ingredientes utilizados en la fabricación de compositas".

Fuente: Prakash, 2010.

1.1. Variables importantes a considerar para los motores cohetes

Las características de los propelentes son muy importantes en el diseño de un motor cohete y, a la vez, evidencian los puntos críticos a mejorar:

- Alto rendimiento o alto impulso específico; esto significa alta temperatura de los gases de combustión y baja masa molecular.
- Velocidad de combustión predecible, reproducible y capaz de ajustarse al diseño del grano y al requisito de tiempo de empuje, que detiene una mínima variación del empuje o de la presión en la cámara, el cambio en el índice de presión, la velocidad de combustión o que el coeficiente de temperatura sea pequeña.



- Propiedades físicas adecuadas (incluyendo grandes fuerzas de adhesión) en el rango de temperatura de funcionamiento previsto.
- Alta densidad (permite un motor pequeño).
- Características de ignición reproducibles y predecibles (tal como fácil encendido cuando hay altas presiones).
- Buenas características de envejecimiento y larga vida útil.
- Baja adsorción de humedad, lo que, a menudo, causa deterioro químico del propelente.
- Fabricación simple, reproducible, segura, de bajo costo y de bajo riesgo.
- Disponibilidad garantizada de todas las materias primas y componentes necesarios para la producción del propelente y un control fácil de impurezas indeseables.
- Bajo riesgo técnico y un historial favorable en aplicaciones anteriores.
- Gases de escape no tóxicos.
- Combustión estable.

Del listado de características, es relevante la propiedad que se refiere a la velocidad de combustión predecible y estable en el tiempo de almacenamiento, la cual tiene directa relación con el modificador de la combustión.

La velocidad de combustión es directamente proporcional a la cantidad de gases calientes generados en la cámara de combustión y a la fuerza de empuje que eleva el cohete. El empuje es muy sensible a esta velocidad de combustión del propelente. Una variación en la velocidad de combustión del propelente de $\pm 1\%$, por ejemplo, dará lugar a una variación de empuje de 1,5 a 2%.

La velocidad de combustión depende de los componentes que hacen parte del propelente sólido. La variación de cualquiera de estos componentes afecta directamente la tasa de combustión. Los factores que pueden cambiar la velocidad de combustión de un propelente sólido son los siguientes:

- Adición de materiales catalizadores o incremento del porcentaje del catalizador existente (de 0,1 a 3 % del propelente).
- Disminución del tamaño de partícula del oxidante.
- Incremento del porcentaje del oxidante.
- Incremento de la cantidad de aglutinante.
- Adición de fibras metálicas dentro del propelente.

Además de los factores que tienen que ver con la composición del propelente sólido, las condiciones internas de presión y temperatura, dentro de la cámara de combustión,



tienen una gran influencia en la tasa de combustión. Para el presente estudio, el efecto del catalizador fue relevante.

El óxido de hierro es ampliamente usado como un catalizador para incrementar la tasa de combustión de propelentes heterogéneos. El cromito de cobre (mezcla de óxido cúprico y óxido de cromo) también es ampliamente usado, sin embargo es incompatible con algunos aglutinantes basados en polibutadieno y con aglutinantes doble base. Un número de catalizadores orgánicos de hierro ha sido usado en propelentes sólidos heterogéneos, pero el más notable ha sido el ferroceno, un componente orgánico de hierro.

La efectividad de varios catalizadores basados en hierro se muestra en la Figura N° 3.

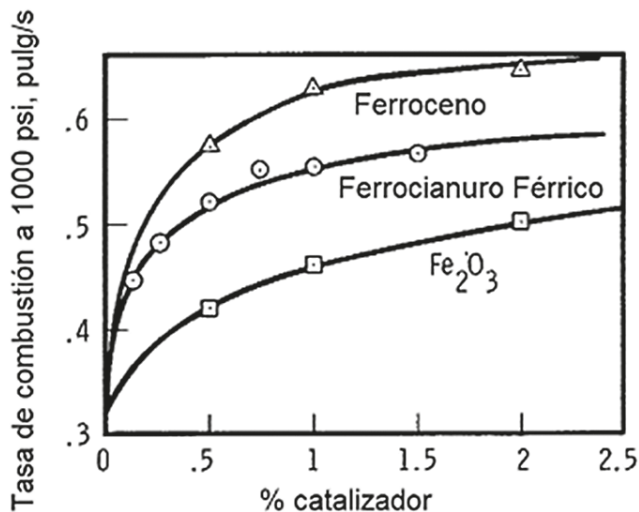


Figura N° 3: "Efecto de catalizador sobre la tasa de combustión".

Fuente: Graciano, 2016.

Según la figura anterior, el Fe₂O₃ es el menos efectivo de los tres, el ferrocianuro férrico está en una posición intermedia y el más efectivo es el ferroceno, pero, debido a su volatilidad, este componente muchas veces se pierde en el proceso de curado y almacenamiento del propelente sólido. Estos catalizadores aumentan la tasa de combustión del propelente, pero solo cuando su porcentaje en la composición total del propelente está cercano al 3%, porque porcentajes más altos ya no tienen un efecto significativo en la tasa de combustión o, inclusive, pueden hacer que disminuya.

Dentro del grupo de modificadores de la velocidad de combustión, se ha incorporado el ferroceno y sus derivados, porque son efectivos en acelerar la reacción de descomposición del PA unido al polibutadieno. Además, químicamente las mezclas de los ingre-



dientes se ven favorecidas. Sin embargo, se han presentado problemas de migración a la superficie del propelente y son susceptibles a la oxidación del grupo ferrocenil.

Otra estrategia ha sido unir químicamente el ferrocenil al HTPB, también denominado Butaceno 800, lo cual mejora la anti-migración y se evita la oxidación por no presentar hidrógeno en el carbono alfa del ferroceno. Esta estrategia está representada en la Figura N° 4:

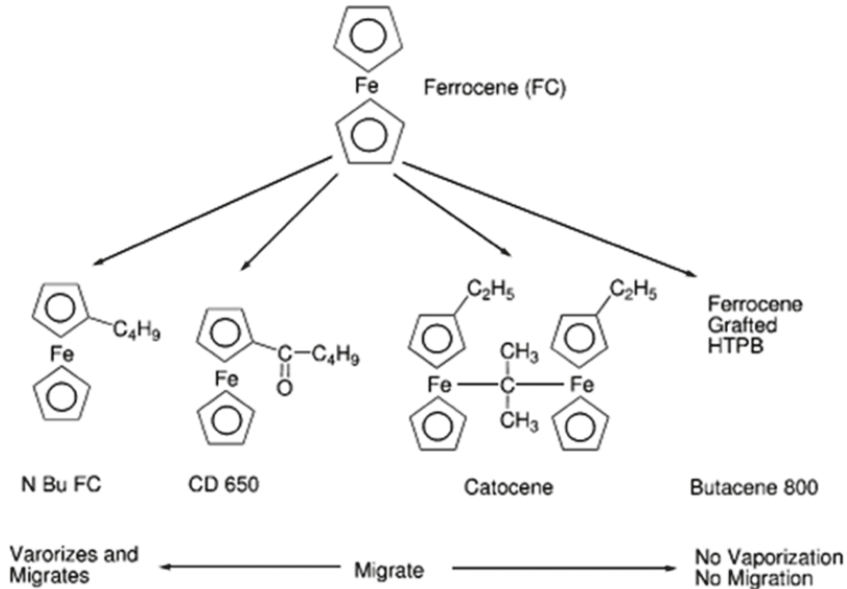


Figura N° 4: “Derivados de ferroceno y efecto en la migración”.

Fuente: Cheng, 2014.

En este esquema se representa el ferroceno y algunos derivados de este que existen actualmente en uso en distintos propelentes de cohetes a nivel mundial. Ejemplo de ello es que los tres primeros son aditivos patentados por el Ejército de Estados Unidos y el butaceno 800 por el Ejército francés.

Cuando comparamos resultados que utilizan diferentes fuentes de hierro, se obtiene lo siguiente:

CATALIZADOR	VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN (MM/S)
Fe ₂ O ₃ (Fe 0,8%)	28,0
Butaceno 800 (Fe 0,5)	40,8

Tabla N° 2: “Efecto del catalizador sobre la velocidad de combustión”.

Fuente: Ghosh, 2014.



La Tabla N° 2 muestra la eficiencia de hierro contenido en propelentes del tipo compuesta con aditivos butaceno 800. La velocidad de combustión es mayor que cuando se usa directamente óxido de hierro.

Por otro lado, pese a presentar excelentes propiedades frente a la velocidad de quemado, los derivados de ferroceno poseen el inconveniente del fenómeno de migración, el cual se encuentra en los procesos de cura y almacenaje del propelente sólido compuesto. La migración debe ser entendida como el fenómeno físico gobernado por el potencial eléctrico, a diferencia del fenómeno de difusión, donde ocurre un desplazamiento de partículas de mayor concentración de energía potencial a otra de menor. Variadas modalidades para disminuir la migración han sido consideradas en los últimos años, en especial, por grupos de investigación asiáticos, quienes han desarrollado una importante industria de lanzamientos espaciales, satélites orbitales, sondas de exploración espacial y, por último, un proyecto de realizar una misión lunar en los próximos años.

Uno de ellos considera la evaluación de compuestos iónicos basados en alquilmetilamonio de nitrato y pricato de diferentes largos de cadena. Estos fueron caracterizados y se obtuvieron resultados respecto a migración, de lo que se concluyó que los compuestos de cadena larga e iones nitrato y pricato tienen el mejor comportamiento antimigratorio comparados con modificadores tradicionales neutros, tales como el catoceno y el *n*-butilferroceno.

Otro caso ha sido la síntesis de adicionar derivados sulfonil y grupos dinucleares de piranzol de ferroceno, que han disminuido la temperatura de descomposición del perclorato de amonio y, a la vez, al presentar una mayor interacción estérica, han provocado una menor evaporación y, por lo tanto, menor migración desde el interior del motor de cohete.

Se evidencia así el fenómeno de migración en este tipo de compuestos, por lo cual toma relevancia, debido a que, a medida que pasa el tiempo, a los propelentes se les deben realizar pruebas de estabilidad. La inestabilidad en propelentes puede provocar efectos catastróficos en los motores cohetes.

Por las razones expuestas anteriormente es que la presente investigación sintetizó y estudió el efecto catalítico de nuevos derivados de ferroceno sobre la descomposición térmica del PA y la velocidad de quemado en propelentes tipo compuesta, debido a que este tipo de compuestos poseen un alto peso molecular, importante solución para el efecto antimigratorio y, además, poseen mayor número de átomos de hierro por molécula, lo que nos otorgará una estrategia novedosa en la fabricación de una nueva formulación en propelentes tipo compuesta (Figura N° 5).

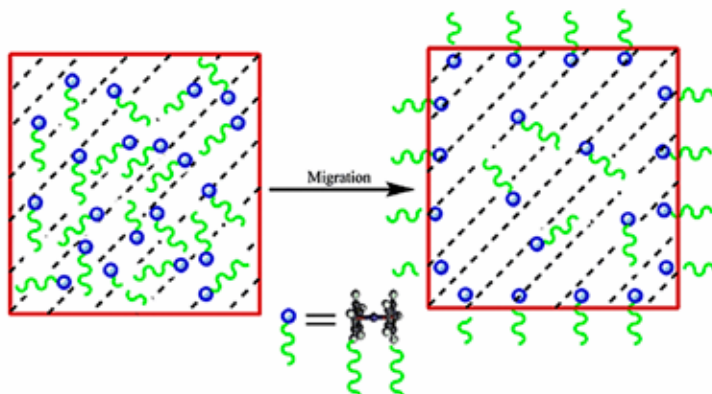


Figura N° 5: “Modelo de migración de derivados de ferroceno basados en la teoría de absorción”

Fuente: Liu, 2014.

La Figura N° 6 explica la reacción general de la preparación de los compuestos organometálicos derivados de ferroceno, los que se estudiaron como catalizadores. Es un esquema general de una ecuación química donde se describe lo que se hizo en el laboratorio de forma general para los 4 compuestos preparados.

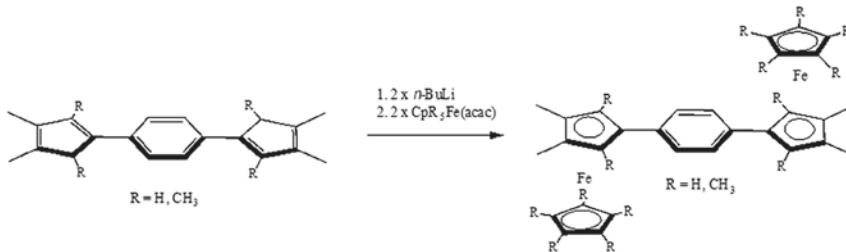


Figura N° 6: “Reacción de preparación de compuestos derivados de ferrocenos utilizados como catalizador de combustión del PA”

Fuente: Zhou, 2016.

2. DESARROLLO Y SELECCIÓN DE ADITIVOS DERIVADOS DE FERROCENO

2.2. Selección de los datos de la descomposición térmica del perclorato de amonio (PA) con catalizadores de óxido férrico y derivados de ferroceno a diferentes concentraciones

2.2.1. Procedimiento general

Todas las manipulaciones se llevaron a cabo bajo una atmósfera de nitrógeno puro utilizando una caja seca de atmósfera Labconco Modelo Fiberglass LABC5080035 y con el uso de una línea de vacío usando técnicas estándar de tubo de Schlenk.



2.2.2. Síntesis orgánica

La síntesis del ligando orgánico *p*-fenileno *p*-Bis(3,4-dimetilciclopentadienil)benceno y *p*-Bis(2,3,4,5-tetrametilciclopentadienil)benceno, que se representa en la Figura N° 7, fueron realizados de acuerdo con métodos descritos por Bunel y colaboradores (Bunel E. *et al.*, 1988).

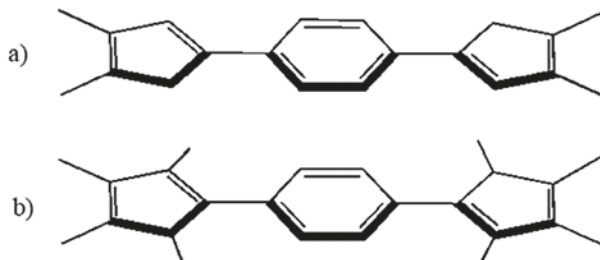


Figura N° 7: "a) *p*-Bis(3,4-dimetilciclopentadienil)benceno y b) *p*-Bis(2,3,4,5-tetrametilciclopentadienil)benceno".

Fuente: Bunel E. *et al.*, 1988.

2.2.3. Síntesis organometálica

La síntesis y caracterización de los compuestos organometálicos derivados del *p*-fenileno, [CpFe-*p*-Ph-FeCp] (1), [Cp*Fe-*p*-Ph-FeCp*] (2), [CpFe-*p*-Ph'-FeCp] (3) y [Cp*Fe-*p*-Ph'-FeCp*] (4), con *p*-Ph: *p*-Bis(3,4-dimetilciclopentadienil)benceno; *p*-Ph': *p*-Bis(2,3,4,5-tetrametilciclopentadienil)benceno, se representan en el compilado de la Figura N° 8, por Bunel y colaboradores, y fueron realizadas de acuerdo con métodos publicados.

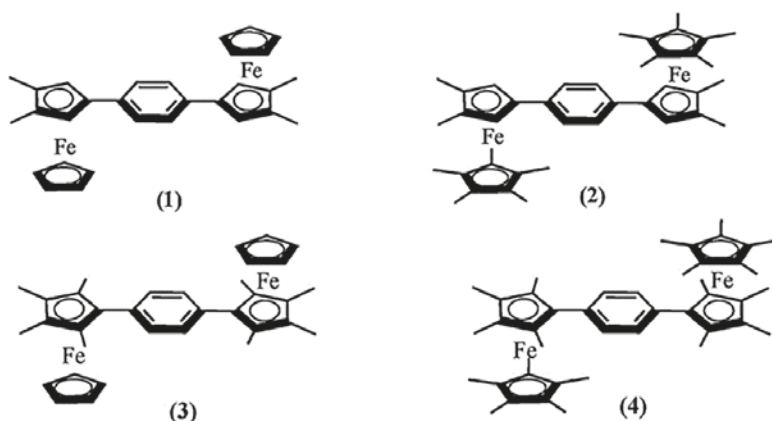


Figura N° 8: "Catalizadores derivados de *p*-fenileno [CpFe-*p*-Ph-FeCp] (1), [Cp*Fe-*p*-Ph-FeCp*] (2), [CpFe-*p*-Ph'-FeCp] (3) y [Cp*Fe-*p*-Ph'-FeCp*] (4).

Fuente: Bunel E. *et al.*, 1988.



2.3. Evaluación catalítica de los compuestos derivados de *p*-fenileno sobre la descomposición térmica del perclorato de amonio (PA).²

2.3.1. Introducción

Habiendo desarrollado los 4 catalizadores derivados de ferroceno explicados anteriormente, se efectuaron pruebas de laboratorio, con el propósito de seleccionar el catalizador que presente el mejor comportamiento relacionado a la temperatura de descomposición. Al analizar los resultados obtenidos en laboratorio, se estudiaron los cambios en las temperaturas de combustión que se produjeron y las concentraciones que estos presentaron.

2.3.2. Procedimiento general

El perclorato amónico (PA) es el más usado por sus buenas propiedades, compatibilidad con otros materiales, buen desempeño, disponibilidad, calidad y uniformidad. Presenta un alto potencial oxidante, por lo que el impulso específico es elevado y es ligeramente soluble en agua. Para nuestra investigación, se usó PA de 200 micras, tamaño necesario para cubrir los espacios que se generan en la mezcla del propelente.

En esta investigación se utilizaron los equipos METTLER TOLEDO y TGA/SDTA 851e METTLER TOLEDO 822e, con el programa STARe 8.1, respectivamente, pertenecientes al Laboratorio de Materiales Energéticos del IDIC, para los análisis de DSC,³ a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, bajo una atmósfera de nitrógeno puro de 50 mL/min, en el intervalo de 140-450 °C (DSC) y de 80-500 °C, termogravimetría (TG), para investigar el comportamiento catalítico de los compuestos derivados de *p*-fenileno en la descomposición térmica de PA.

Cantidades específicas de los compuestos sintetizados y PA se mezclaron y homogenizaron en un mortero de ágata hasta lograr una uniformidad visual de las partículas finamente molidas. Las mezclas se prepararon de igual forma a concentración de 2,4 y 6%, respectivamente.

Las muestras ya preparadas a la concentración requerida se introdujeron en crisoles de aluminio de 40 µL con pin y tapa sellada mediante prensa; en el caso de los análisis de TG, se utilizaron crisoles de alúmina con tapa perforada sobrepuesta de 70 µL.

2.3.3. Procedimiento general de ejecución de pruebas

Los compuestos bimetálicos derivados del *p*-fenileno se exploraron como promotores de la descomposición térmica del perclorato de amonio (PA), el componente clave de los

2 Trabajo desarrollado en el Laboratorio Químico del Instituto de Investigaciones y Control del Ejército.

3 Del inglés: *Differential Scanning Calorimetry* (Calorimetría Diferencial de Barrido).



propulsores sólidos compuestos. El rendimiento de los compuestos en la descomposición térmica de PA se determinó a través de mediciones DSC y TG con una velocidad de calentamiento de 5 °C / min en atmósfera de N₂ en el rango de 140-450 °C. Las Figuras N° 9, 10, 11 y 12 muestran las curvas de DSC obtenidas con diferentes porcentajes de concentración de la mezcla de PA con los compuestos bimetálicos investigados.

En general, la actividad catalítica de un catalizador de velocidad de quemado en un prope-lente sólido puede evaluarse mediante el estudio de su efecto sobre la degradación térmica de PA por instrumentos o equipos de TG y DSC. El porcentaje en peso de catalizadores de velocidad de quemado basado en ferroceno utilizados en PA fue de 2,4 y 6% en peso.

Compuesto 1

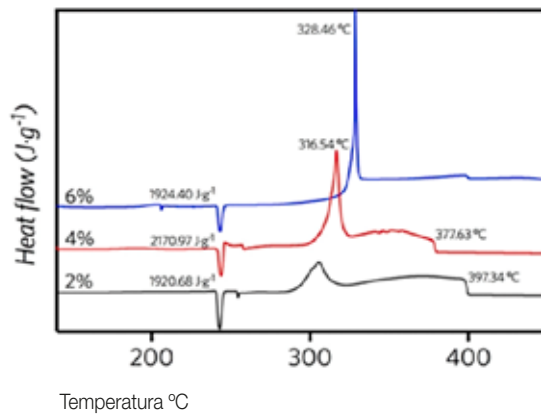


Figura N° 9: "Curvas DSC de AP con diferentes porcentajes (% en peso) del compuesto (1) [CpFe-p-Ph-FeCp]".

Fuente: Povea *et al.*, 2018.

Compuesto 2

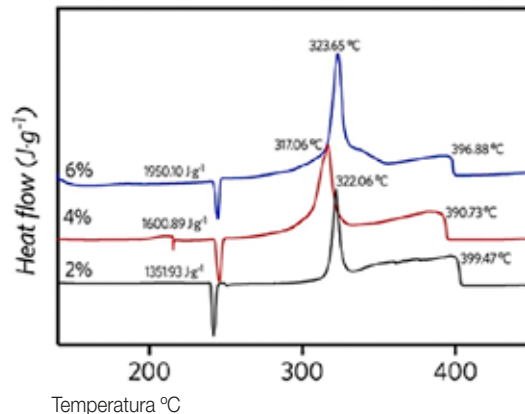


Figura N° 10: "Curvas DSC de AP con diferentes porcentajes (% en peso) del compuesto (2) [Cp*Fe-p-Ph-FeCp*]".

Fuente: Povea *et al.*, 2018.



Compuesto 3

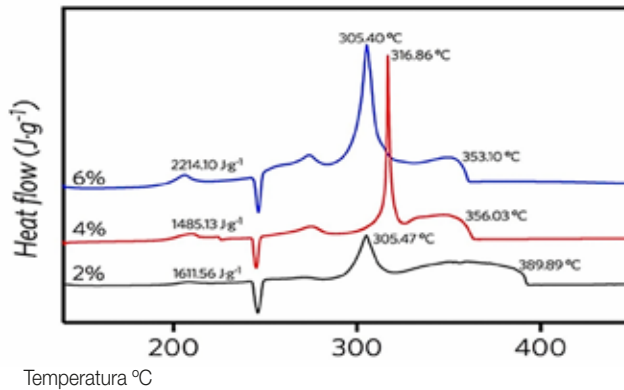


Figura N° 11: "Curvas DSC de AP con diferentes porcentajes (% en peso) del compuesto (3) [CpFe-p-Ph'-FeCp]".

Fuente: Povea *et al.*, 2018.

Compuesto 4

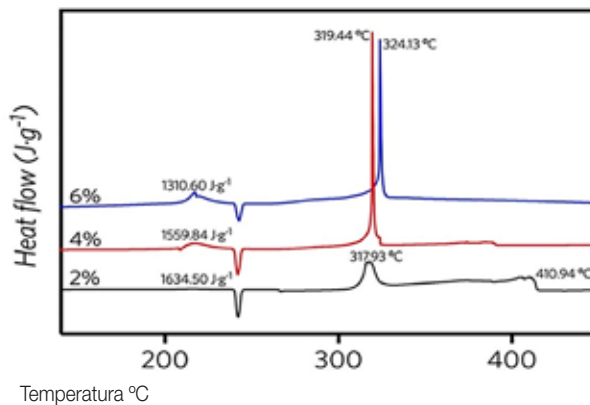


Figura N° 12: "Curvas DSC de PA con diferentes porcentajes (% en peso) del compuesto (4) [Cp*Fe-p-Ph'-FeCp*]".

Fuente: Povea *et al.*, 2018.

Se observó que el proceso endotérmico de transición de fase de PA alcanzó su punto máximo a 249 °C, lo que es un desplazamiento despreciable (aproximadamente 4 °C), y exhibió una forma similar a diferentes concentraciones 2-6 % en peso de (1), (2), (3) y (4) como catalizador, lo cual indica que los catalizadores ejercen poco efecto sobre la temperatura de transición cristalográfica del PA. Sin embargo, tanto la etapa de descomposición a baja temperatura (LTD) (temperatura máxima a 320 °C, observado en las curvas de DSC) como la etapa de descomposición a alta temperatura (HTD) (temperatura máxima a 418 °C, observado en las curvas de DSC) del PA se ven significativamente afectadas por la adición de los catalizadores derivados de *p*-fenileno.



El amplio rango de temperatura de descomposición de PA se redujo considerablemente y el calor liberado de PA aumentó. Las curvas DSC de PA y PA puro con 2% en peso de los catalizadores derivados de p-fenileno son muy similares.

El proceso exotérmico sugiere que la descomposición a alta temperatura (HTD) de PA con los aditivos ocurre, predominantemente, a través de la descomposición térmica. Esto implica que los aditivos tienen un mayor efecto catalítico sobre el HTD de PA que en la etapa inicial. Sin embargo, cuando el porcentaje en peso de compuestos neutros se incrementó adicionalmente, del 2% al 6%, el efecto catalítico no mejoró, con la excepción del compuesto (3), obteniendo los mejores efectos catalíticos a 4% en peso.

Se escogió 4% en peso como la cantidad óptima de cada compuesto, para la evaluación de sus efectos catalíticos. Luego de agregar 4% en peso de los compuestos (1), (2), (3) y (4) (Figuras N° 9, 10, 11 y 12), las temperaturas de descomposición térmica más altas fueron 377,6 °C; 390,7 °C; 356,0 °C y 319,4 °C, respectivamente, las que disminuyeron en 40,4 °C; 26,3 °C; 62,0 °C y 98,6 °C comparado con PA puro, lo que indicó que los aditivos tienen un notorio efecto catalítico sobre la descomposición térmica de PA.

Se observó que todas las curvas DSC, excepto la del compuesto (4), mostraban una forma similar con dos picos en cada curva DSC, lo que sugirió que debería esperarse un mecanismo de descomposición idéntico en todas las mezclas.

Con respecto al compuesto (4), solo un pico exotérmico se volvió más nítido, lo que indicó que el proceso de descomposición de PA ocurrió más rápidamente.

Al comparar el compuesto monometálico ferroceno con todos los compuestos bi-metálicos, las etapas exotérmicas de PA se vieron más influenciadas. El calor liberado del compuesto (4) fue mayor que el del compuesto de ferroceno (1559.8 J/g).

A continuación se presenta en la Tabla N° 3 un resumen del efecto catalítico (4% en peso) sobre la descomposición térmica de PA y de los derivados de ferroceno.

COMPUESTO	HTD DE AP/°C	CALOR LIBERADO /JG ⁻¹
NH ₄ ClO ₄ (AP)	418,0	943,4
(Fc)	359,9	1312,9
(1)	377,6	2171,0
(2)	390,7	1600,9



COMPUESTO	HTD DE AP/°C	CALOR LIBERADO /JG ⁻¹
(3)	356,0	1485,1
(4)	319,4	1559,8
(Cat)	345,9	2471,5

Tabla N° 3: "Resumen del efecto catalítico (4% en peso) sobre la descomposición térmica de PA y de los derivados de ferroceno".

Fuente: Povea *et al.*, 2018.

Todos los compuestos redujeron la temperatura de descomposición térmica de PA, lo que fue probado, adicionalmente, por los experimentos de TG o Termogravimetría.

2.3.4. Las curvas TGA (análisis de termogravimetría) de PA puro y PA con los diferentes catalizadores de derivados de p-fenileno

El análisis de termogravimetría se desarrolló para ver el efecto catalítico del PA. A partir de este, se observa cómo una muestra sólida inicial va perdiendo peso hasta descomponerse completamente (Figura N° 13).

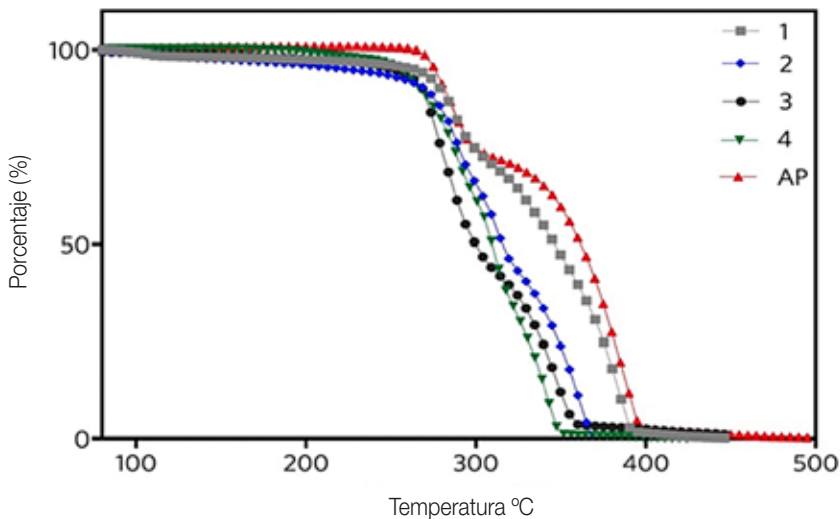


Figura N° 13: "Curvas TGA de PA puro y PA con los diferentes catalizadores de derivados de p-fenileno".

Fuente: Povea, *et al.*, 2018.

Como se muestra en la Figura N° 13, después de agregar la concentración al 4% de los compuestos, las curvas TGA exhibieron un proceso de descomposición aproximadamente a 280 °C y cesaron su pérdida de peso entre los 350-390 °C, desplazando la temperatura de descomposición final del PA puro dramáticamente. Además, la curva TG de PA puro presentó dos pasos notorios de pérdida de peso.



Del resultado del termograma, se pudo observar que para PA-(1), PA-(2) y PA-(3) las pérdidas de peso se dividieron en dos etapas principales. La primera ocurrió en el rango de 280-320 °C, mostrando un proceso de pérdida de peso lento con una pérdida de masa de aproximadamente un 50%.

Las etapas adicionales de pérdida de peso sucedieron en el rango de 310-390 °C. En sus respectivas curvas DSC, se observó que existen dos procesos de descomposición exotérmica, con picos ubicados en el rango de 320-399 °C. Los calores exotérmicos estaban en el rango de 1485-2460 J/g.

Por otro lado, las curvas TG de PA en presencia del compuesto (4) solo mostraron un paso de pérdida de peso, de acuerdo con la tendencia de descomposición de la curva DSC, con calores exotérmicos de 1559.8 J/g.

Todos estos compuestos presentaron un efecto catalítico en la descomposición térmica del PA, desplazando las menores temperaturas.

También se pudo observar que las temperaturas finales de descomposición de PA con el compuesto (4) como aditivo son menores (efecto positivo) que los otros compuestos. Sin embargo, el efecto de los catalizadores de velocidad de quemado no solo puede centrarse en la influencia sobre la descomposición térmica de PA. Los resultados confirmaron que los compuestos bimetálicos derivados de p-fenileno, podrían tener aplicaciones potenciales como catalizadores de velocidad de combustión en propelentes sólidos compuestos en motores de cohetes.

Consecuente con lo expuesto, el investigador puede afirmar que el compuesto que obtuvo el mejor comportamiento en las prueba de laboratorio fue el compuesto (4) de los derivados de ferroceno, el cual se denominará "Ferroceno F". Esto permitirá emplearlo en las pruebas que se realizaron con posterioridad a nivel industrial en FAMA E.

2.4. Medición de datos de velocidad de quemado del propelente a base de perclorato de amonio (PA), con catalizador de óxido férrico y el catalizador seleccionado de derivado de ferroceno

A continuación, se indica el procedimiento elaborado para la producción conforme al plan y protocolo de pruebas para propelentes tipo composita, integrando aditivos o catalizadores de óxido férrico de uso permanente en propelentes para cohetes en la Planta de Cohetes y Misiles de FAMA E y el catalizador seleccionado, en las pruebas de laboratorio desarrolladas en IDIC.



Evaluación de un nuevo propelente derivado del perclorato de amonio, modificado con derivados de ferroceno, y...



Figura N° 14: "Esquema de fabricación de propelente tipo composita"

Fuente: elaboración propia.

2.4.1. Procedimiento general de secado del perclorato de amonio

El secado del PA se desarrolla, principalmente, por su condición de higroscopía (absorción de humedad del medio) en un horno de secado. Este procedimiento se desarrolló con operarios de la Planta de Cohetes de FAMAE.



Figura N° 15: "Horno Eurotherm tipo termocupla"

Fuente: archivo del autor.



2.4.2. Procedimiento general de molienda del perclorato de amonio

El perclorato de amonio es introducido al molino para disminuir la magnitud del PA de 200 micras a 8 micras, después de haber sido secado. Esto con el fin de ocupar los espacios que se pudiesen producir en la mezcla que se realizó, de manera posterior, con otros ingredientes a utilizar para la producción de composita.



Figura N° 16: "Molino Eurotherm tipo dispersión".

Fuente: archivo del autor.

2.4.3. Procedimiento general de fabricación y curado del propelente

Se materializa mediante mezclas de diferentes componentes para propelentes de tipo composita que fueron señalados en la Tabla N° 1, "Ingredientes utilizados en la fabricación de compositas", donde se individualizan todos aquellos que fueron considerados en el proceso de mezclado en el edificio de fabricación del propelente.

Posterior al logro de la mezcla de los componentes del propelente, se desarrolló el llenado de K-Round (cohetes de menor magnitud) y el proceso de curado del propelente.

El curado del propelente hace referencia al tiempo que demora la mezcla realizada en endurecer, este proceso duró 7 días.

En los K-Round fueron considerados la adición de los aditivos o catalizadores de óxido férrico y el nuevo aditivo derivado de ferroceno (ferroceno F).



Figura N° 17: "Instrumento de mezclado para la producción del propelente".

Fuente: archivo del autor.

2.4.4. Procedimiento general de quemado estático de K-Round

La intención del quemado de K-Round fue validar el uso de un catalizador o aditivo derivado de ferroceno (ferroceno F) en propelentes tipo composita aluminizada en base HTPB, buscando obtener respuestas favorables para posibles aplicaciones en el desarrollo de motores para cohetes del Ejército. Se efectuó en una plataforma rígida de cemento donde se quemaron los propelentes para cohetes. Se consideró la conexión de instrumentos de medición de variables como presiones y velocidades de quemado.



Figura N° 18: "Quemado de K-Round en un banco estático de pruebas".

Fuente: archivo del autor.



3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Curvas de presiones y velocidades de quemado

Las velocidades de combustión se determinaron en el rango de presión de 7.00–30.00 MPa.

La composición base (sin modificador) exhibió velocidades de combustión del orden de 10.49-16.24 mm/s en gráficos y análisis de K-Round.

Como se observa en la Figura N° 19, el exponente de presión (n) obtenido fue de 0.301.

La adición del modificador o catalizador en la formulación de la composita por ferroceno F (0.27% en peso) lleva a un aumento en la velocidad de combustión de 12.80–18.42 mm/s, lo que significa un incremento en un 20% en comparación con la muestra base. El exponente de presión (n) obtenido fue de 0.250.

La adición del modificador o catalizador en la formulación de la composita por óxido férrico (Fe_2O_3) (0.4%) lleva a un aumento en la velocidad de combustión de 15.17–24.77 mm/s, lo que significa un incremento en un 45% del BR⁴. El exponente de presión (n) obtenido fue de 0.337.

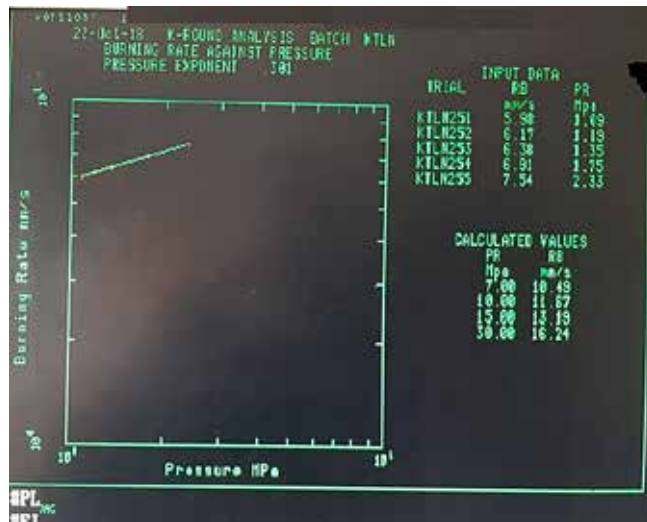


Figura N° 19: "Análisis de K-Round composita sin aditivos".

Fuente: archivo del autor.

4 Del inglés Burning Rate, que se refiere a la velocidad de combustión.



3.2. Curvas de quemado

Los especialistas en cohetes eligen un propelente para una cierta misión determinada en función de los requisitos. También eligen el propelente para quemar en un patrón definido, teniendo en cuenta los requisitos funcionales generales del objetivo.

Este patrón definido de combustión se logra aplicando materiales poliméricos (que no se queman fácilmente) sobre la superficie del propelente. Estos materiales poliméricos se llaman “materiales inhibidores” o “inhibidores” y el proceso de su aplicación se conoce como “inhibición”. El rendimiento de un cohete o misil depende no solo del propelente, sino también, en gran medida, del sistema de inhibición. Hay tres tipos principales de perfiles de presión-tiempo (P-t): (i) neutro, (ii) regresivo y (iii) progresivo. Por lo tanto, el modo de inhibición se rige, principalmente, por el tipo de perfil de P-t que desean los especialistas de propelentes para cohetes.

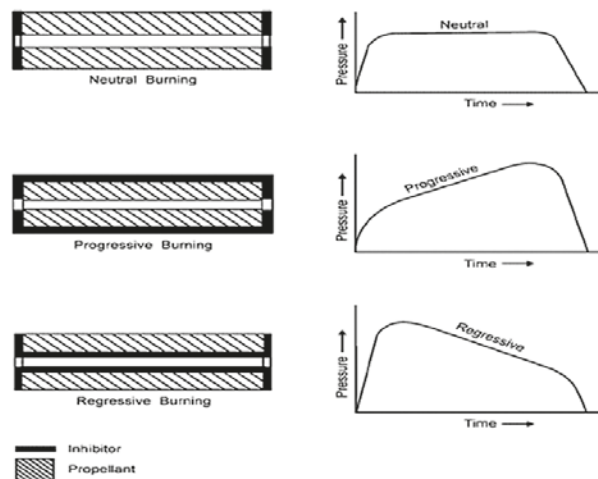


Figura N° 20: “Modos de inhibición con el perfil de presión-tiempo”.

Fuente: Kulkarni, 2005.

De acuerdo con los datos obtenidos en el banco de quemado estático de la planta de cohetes y misiles de FAMA E, se obtuvieron las velocidades de combustión en el rango de presión de 7.00–30.00 MPa, con perfiles de presión-tiempo correspondientes a un perfil neutro.

3.3. Velocidades de quemado

Las velocidades de quemado determinadas en el rango de presión de 7.0–30.0 MPa, indican que, al incorporar el modificador de ferroceno F (0.27% en peso) a la formulación de la composita, aumentó la velocidad de combustión en el rango de 12.80–18.42 mm/s, lo que significa un incremento en un 22% en comparación con la muestra base.



La adición del modificador o catalizador en la formulación de la composita por óxido férrico (Fe_2O_3) (0.4% en peso) lleva a un aumento en la velocidad de combustión de 15.17–24.77 mm/s, lo que significa un incremento en un 45% de la velocidad de quemado en relación con la muestra base.

FORMULACIÓN COMPOSITA	VELOCIDAD DE QUEMADO (BURNING RATE) (MM/S)				EXPONENTE DE PRESIÓN (N) (7-30 MPA)
	7.0 MPA	10.0 MPA	15.0 MPA	30.0 MPA	
Base	10.49	11.67	13.19	16.24	0.301
Con óxido férrico	15.17	17.10	19.61	24.77	0.337
Con ferroceno F	12.80	13.99	15.49	18.42	0.250

Tabla N° 4: "Propiedades balísticas de la composita con y sin modificador".

Fuente: elaboración propia.

3.4. Exponente de presión

Los modificadores de velocidad de quemado se utilizaron para modificar la velocidad de combustión del propelente y para ajustar el exponente de presión (n) de la curva de presión de velocidad de combustión en la zona de presión donde operó el grano del propelente.

La ley de velocidad de combustión (BR) versus presión se expresa, generalmente, por la fórmula dada por "San Roberto y Vielle" en la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación: } BR = a * P^n$$

donde, (n) es el exponente de presión, (a) es la velocidad de combustión constante y (P) es la presión de la cámara expresado en MPa. Para un propelente, generalmente, los valores de (n) oscilan entre 0.2 y 0.7 a una presión que varía de 3-30 MPa.

De acuerdo con las velocidades de quemado obtenidas en el rango de presión descrito anteriormente, el exponente de presión (n) se determinó para la composita con óxido férrico como modificador con un valor de 0.337.

En relación con las velocidades de quemado obtenidas para la composita con Ferroceno F como modificador, el exponente de presión (n) determinado fue de 0.250.

Debido a que cuanto menor sea el valor del exponente de presión (n), más rápidamente regresará la presión al equilibrio, un valor bajo de (n) permitirá el diseño de motores de cohetes ligeros. La constante (n) es una medida de la dependencia de velocidad de quemado (BR) sobre la presión de la cámara (P). Un valor de (n) de 0.80 indica una fuerte dependencia de BR sobre P , mientras que la de 0.20 indica una dependencia relativamente baja. Esto es muy importante porque si por alguna razón P aumenta y (n)



es grande, la BR aumenta y P aumenta aún más. El efecto acumulativo de tales variaciones conduce fácilmente a la explosión o falla del motor de cohete.

De acuerdo con Kulkarni y colaboradores (2015), el mejor efecto catalítico se observa en términos de la combinación de altas velocidades de combustión y menores valores de exponente de presión (n). Las tendencias obtenidas durante este trabajo establecen el potencial del ferroceno F como modificador balístico efectivo para propelentes compuestos, debido a su velocidad de quemado ($BR = 12.80$ a 7MPa) y el exponente de presión bajo ($n = 0.25$), lo que sugiere una mayor flexibilidad para el diseño de cohetes a base de perclorato de amonio.

4. CONCLUSIONES

Tal como fue descrito en esta contribución, el ferroceno y sus derivados han sido ampliamente estudiados y reportados como efectivos catalizadores en la velocidad de quemado de propelentes tipo composita a base de perclorato de amonio y son superiores candidatos para la aplicación en motores de cohetes con un alto empuje y poder de aceleración. Estos compuestos son químicamente compatibles con los otros ingredientes del propelente, particularmente con el agente aglutinante HTPB, sin afectar la vida útil ni sus propiedades mecánicas. Además, muestran una menor influencia sobre la sensibilidad y estabilidad del envejecimiento.

Sin embargo, las desventajas inherentes de estos sistemas catalíticos se ven reflejadas en el fenómeno de migración y sublimación durante el proceso de curado del propelente, el cual produce un deterioro del motor de cohete. Para subsanar estas desventajas se prepararon cuatro derivados de ferroceno bimetálicos de alto peso molecular de modo de prevenir el fenómeno de la migración, donde, a partir de las pruebas a nivel de laboratorio utilizando la técnica de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y observando el efecto catalítico sobre la descomposición térmica del perclorato de amonio, fue elegido el derivado ferroceno F como el mejor de su clase, con el cual no se observó el fenómeno de migración durante la preparación de los K-Round. De este modo, hemos obtenido resultados balísticos reproducibles y confiables.

De los resultados obtenidos, el mejor efecto catalítico se observó con el aditivo de Fe_2O_3 , en términos de velocidad de quemado. Sin embargo, en términos de la combinación del aumento en la velocidad de quemado, menor valor del exponente de presión (n) y menor concentración (% en peso) en la formulación de la composita, el modificador de Ferroceno F fue el que presentó mejor efecto catalítico. Por tanto, se puede afirmar que el aditivo desarrollado derivado del ferroceno tiene un efecto por sobre los propelentes tipo composita. Además, al obtener un bajo exponente de presión (n), entrega mayor flexibilidad a la fabricación de nuevos prototipos para motores de cohetes, permitiendo, con esto, adquirir una nueva herramienta tecnológica y de conocimiento para la Institución y para el desarrollo de una futura investigación de estas características, las cuales son importantes para el desarrollo de la defensa y la tecnología aeroespacial.



BIBLIOGRAFÍA

- Bunel, E. *et al.* (1988). "Syntheses of p-Phenylene- and p-Biphenylene-Bridged Methylated Binuclear Ferrocenes". *Organometallics*, vol.7, pp. 474-476.
- Cheng, Z. (2014). "Synthesis, characterization, migration and catalytic effects of energetic ferrocene compounds on thermal decomposition of main components of solid propellants". *Inorganica Chimica Acta* 421, pp. 191-199.
- Ghosh, K. (2014). "Studies on Aluminized, High Burning Rate, Butacene® Based, Composite Propellants". *Central European Journal of Energetic Materials*, pp. 11(3), 323-333.
- Graciano, D. (2016). *Caracterización de la combustión y balística interna de propelentes sólidos heterogéneos basados en resina epóxica y nitrato de potasio para aplicaciones en motores cohete*. Antioquía, Colombia: Universidad de Antioquía.
- Kulkarni, P. (2005). "Studies on salts of 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one (NTO) and 2,4,6-trinitroanilino benzoic acid (TABA): Potential energetic ballistic modifiers". *Journal of Hazardous Materials A*, 123, pp. 54-60.
- Liu, X. (2014). "Synthesis, characterization, migration studies and combustion catalytic performances of energetic ionic binuclear ferrocene compounds". *Journal of Organometallic Chemistry* 762, pp. 1-8.
- Morales-Verdejo, C. (2017). "Effect of the homo- and heterobimetallic compounds derived from s-indacene on the thermal decomposition of ammonium perchlorate". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 1-11.
- Orbovic, N. (2011). *Explosivos, propelentes y pirotecnia, estado del arte*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.
- Povea, P. *et al.* (2018). "Catalytic effects of p-Phenylene-bridged methylated binuclear ferrocenes on thermal decomposition of the main component of composite solid propellants". *Thermochimica Acta* 666, pp. 181-189.
- Prakash, J. (2010). *High Energy Materials*. Psdtow, Gran Bretaña: Wiley.
- Zhou, W. (2016). "Progress on the synthesis and catalytic and anti-migration properties of ferrocene-based burning rate catalysts". *Applied Organometallic Chemistry*, pp. 1-10.
- Zhuo, J. (2014). "Ferrocene-based sulfonyl dihydropyrazole derivatives: Synthesis, structure, electrochemistry and effect on thermal decomposition of NH₄ClO₄". *Journal of Molecular Structure* 1067, pp. 112-119.
- Zhuo, J. (2015). "Synthesis of two nickel (II) complexes bearing pyrrolide-imine ligand and their catalytic effects on thermal decomposition of ammonium perchlorate". *Journal of Molecular Structure* 1085, pp. 13-20.



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR



PROCEDIMIENTO EDITORIAL

1. 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.
2. Para su redacción, 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.
3. 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 solicitarla a extension@acapomil.cl).
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Una vez terminado este proceso, se inicia la revisión por parte de evaluadores externos a la ACAPOMIL.



8. Cumplido esto último, se informará al autor de su aceptación inmediata, aceptación previa mejoras mayores o de su rechazo (sin apelación), a través de un correo electrónico por parte del jefe o asesor de la Sección Extensión.
9. 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.
10. El autor de la colaboración publicada recibirá como agradecimiento una copia impresa de la revista.
11. El Consejo Editorial puede modificar el presente procedimiento sin previo aviso.



ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

Avda. Valenzuela Llanos N° 623

La Reina, Santiago, Chile

www.acapomil.cl

www.boletincientifico.cl