



Ejército de Chile

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

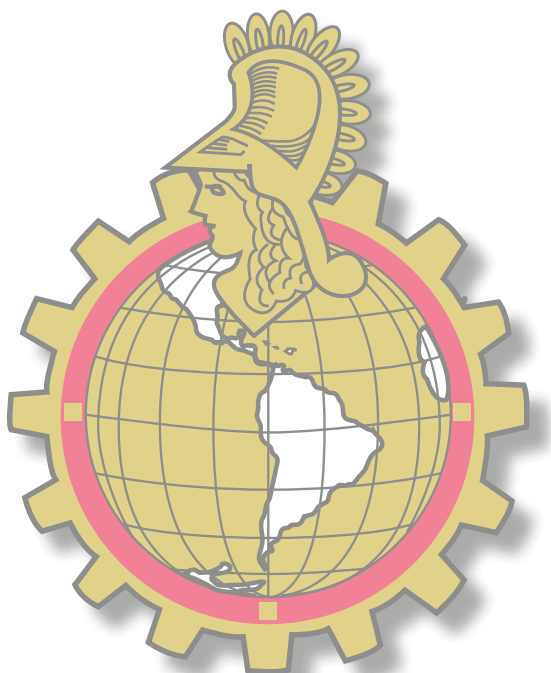


90 AÑOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO N° 20

2015 - 2016



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

El Boletín Científico Tecnológico es la publicación oficial de difusión de la Academia Politécnica Militar.

Su objetivo es servir a la divulgación de las actividades de investigación y desarrollo del conocimiento científico tecnológico de aplicación militar que realizan los estudiantes y profesores del Instituto, la industria militar y otros organismos similares, con el propósito de compartir los logros alcanzados con la comunidad científica nacional e internacional.

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, estudiosos de las ciencias de la ingeniería, invitándolos a compartir estas páginas, con el solo espíritu de conocer los distintos logros académicos alcanzados en pos de la investigación y la ciencia.

Editor responsable:

Coronel Sergio Nazar Martínez.

El Boletín Científico Tecnológico se publica anualmente y está registrado bajo el ISSN 0718-1191, en su actual versión.

Dirección postal: Avda. Valenzuela Llanos N° 623, La Reina, Santiago, Chile. Sitio web www.acapomil.cl, teléfono (562) 226683602, fax (562) 226683606.

Todos los artículos son de 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

Impreso en Chile / Printed in Chile.



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

Nº 20, JULIO 2016 ISSN 0718-1191

Director

Coronel Sergio Nazar Martínez

Oficial de Ejército del arma de Infantería. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de armas mención Química de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Ciencias Militares con mención en Preparación, Evaluación y Gestión de Proyectos Privados Sociales y de Defensa de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Sistemas de Armas y Vehículos Militares Academia Politécnica Militar. Actualmente se desempeña como Director de la Academia Politécnica Militar del Ejército de Chile.

Editor y Secretario

Teniente Coronel Jaime Arcas Suárez

Oficial de Ejército del arma de Infantería. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas mención Geoinformática de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Ciencias Militares con mención en Preparación, Evaluación y Gestión de Proyectos Privados Sociales y de Defensa de la Academia Politécnica Militar. Magíster en gestión educacional de la Universidad Andrés Bello. Máster en gestión educacional de la Universidad Europea de Madrid. Actualmente se desempeña como Jefe del Departamento de Investigación y Desarrollo de la Academia Politécnica Militar.

CONSEJO EDITORIAL

Presidente

Coronel Sergio Nazar Martínez

Director de la Academia Politécnica Militar



Consejeros

GDB. Hernán Araya Santis

Oficial de Ejército del arma de Artillería. Ingeniero Politécnico Militar Aeronáutico. Magíster en Sistemas de Armas y Vehículos Militares Universidad de Cranfield Inglaterra. Magíster en Ciencias Militares con mención en Preparación, Evaluación y Gestión de Proyectos Privados Sociales y de Defensa de la Academia Politécnica Militar. Actualmente se desempeña como Director de Proyectos e Investigaciones del Ejército en el Estado Mayor General del Ejército.

CRL. Rodrigo Sobarzo Véliz

Oficial de Ejército del Servicio de Material de Guerra. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas mención Química de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Logística Integral Pontificia Universidad de Comillas Madrid 2006. Magíster en Logística y Gestión Económica de la Defensa, Universidad Complutense de Madrid 2014. Actualmente se desempeña como Director del Instituto de Investigaciones y Control del Ejército.

GDB. Carlos Villalobos Vera

Oficial de Ejército del Servicio de Material de Guerra. Ingeniero Politécnico Militar en Armamento de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Administración y Dirección de Empresas. Magíster en Ingeniería de Sistemas Logísticos de la Academia Politécnica Militar. Actualmente se desempeña como Gerente de Investigación, Innovación y Desarrollo en las Fábricas y Maestranzas del Ejército.

CRL. O'Higgins Bravo Sandoval

Oficial de Ejército del arma de Ingenieros. Ingeniero Politécnico Militar en Armamento de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención Diseño en Sistemas de Armas Universidad de Cranfield Inglaterra. Actualmente se desempeña en el Departamento de Investigación y Desarrollo de la Academia Politécnica Militar.

CRL. Oscar Urzúa Martínez

Oficial de Ejército del arma de Infantería. Ingeniero Politécnico Militar en Armamento de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención Diseño en Sistemas de Armas Universidad de Cranfield Inglaterra. Actualmente se desempeña en la Gerencia de Investigación Innovación y Desarrollo en las Fábricas y Maestranzas del Ejército.

TCL. Andrés Barros González

Oficial de Ejército del arma de Artillería, Oficial de Estado Mayor de la Academia de Guerra del Ejército. Magíster en Ciencias Militares con mención en Planificación y Gestión Estratégica de la Academia de Guerra del Ejército. Actualmente se desempeña en la Dirección de Inteligencia del Ejército, dependiente del Estado Mayor del Ejército como Jefe de Sección.

TCL. Martín Inzunza Núñez

Oficial de Ejército del arma de Artillería. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas con mención en Geoinformática de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Ciencias Militares con mención en Preparación, Evaluación y Gestión de Proyectos Privados Sociales y de Defensa de la Academia Politécnica Militar. Técnico Universitario especialista en infraestructura de datos especiales y su puesta en marcha con herramientas OpenSource. Actualmente se desempeña en el Comando de Industria Militar e Ingeniería, dependiente del Estado Mayor General del Ejército.

TCL. Carlos Prado Casanova

Oficial de Ejército del arma de Ingenieros. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas con mención en Geoinformática de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra, Universidad de Twente Holanda. Actualmente se desempeña como Subdirector Geográfico del Instituto Geográfico Militar.



TCL. Víctor Fuenzalida Saavedra

Oficial de Ejército del arma de Telecomunicaciones. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas Logísticos con mención Mantenimiento de la Academia Politécnica Militar. Actualmente se desempeña en la Jefatura de Sistemas de Armas, División Mantenimiento dependiente del Comando de Apoyo a las Fuerzas.

CAP. Jorge Vásquez Albornoz

Oficial de Ejército del arma de Artillería. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas con mención en Mecánica de la Academia Politécnica Militar. Master of Science in Mechanical Engineering. Master of Science in Computational Design and Manufacturing. Actualmente se desempeña en el Centro de Modelación y Simulación como Jefe de Sección Investigación Operacional dependiente del Comando de Educación y Doctrina del Ejército.

CAP. Gonzalo Bautista Gatica

Oficial de Reserva del Ejército. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas con mención en Mecánica de la Academia Politécnica Militar. Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Tarapacá. Master en Ingeniería del Mantenimiento, Universidad Politécnica de Valencia, España. Actualmente se desempeña en el Departamento de Desarrollo y Proyectos de la División Mantenimiento del Ejército.

Aquiles H. Sepúlveda Osses

Doctor en Metalurgia y Diplomado en Estudios de Profundización en Metalurgia (3er. Ciclo). Universidad de París VI. Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile. Académico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile; Profesor de la Academia Politécnica Militar y Asesor de Ingeniería del Instituto de Investigación y Control del Ejército de Chile. Visiting Research Fellow, U. de Sheffield (1986).

Hermann Manríquez Tirado

Geógrafo y Licenciado en Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Doctor en Geografía, Paisaje y Medio Ambiente de la Universidad de Barcelona, España. Profesor de Geografía Física y Geografía de Chile en la Pontificia Universidad Católica de Chile y en la Universidad Tecnológica Metropolitana. Actualmente se desempeña como Analista de Relaciones Nacionales en el Instituto Geográfico Militar.

Julio Fernández Bobadilla

Bibliotecario Documentalista, Universidad Tecnológica Metropolitana. Actualmente se desempeña en el Departamento de Investigación y Desarrollo de la Academia Politécnica Militar.



SUMARIO

Editorial	13
Artículos	17
Gestión de las energías renovables no convencionales de generación intermitente.	17
Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.	31
Accidente por doble carga en morteros.	57
Integración de un radar de vigilancia en la plataforma vehicular de un pelotón de exploración terrestre (PET).	79
Diseño de detalle de un polígono de tiro virtual inalámbrico, modular y transportable para fusil Galil.	109
Una mirada al pasado de la cartografía de Chile.	129
Realidad aumentada como herramienta TICs para facilitar la enseñanza aprendizaje.	147
Análisis de nuevas técnicas de empleo y mejoramiento del material blindado Leopard.	169
Derivados de ferrocenos como catalizadores en la velocidad de combustión de propelentes.	187

EDITORIAL



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR



EDITORIAL



SERGIO NAZAR MARTÍNEZ
Coronel
Director de la Academia Politécnica Militar

Vivimos en la “Sociedad del Conocimiento”, cuya predecesora fue la “Sociedad de la Información”, donde el progreso científico-tecnológico avasalla el futuro humano con una fuerza incontenible que obliga al hombre a prepararse y aprender, siendo este el único camino que le servirá en su futuro incierto, en donde los conocimientos quedan obsoletos en el corto plazo.

Bajo esta mirada donde los cambios se suceden a diario y comprometidos con nuestro propio devenir histórico, hemos querido romper con las cadenas del presente, adecuando nuestra publicación oficial de difusión académica con un nuevo formato editorial, dando paso a un renovado Boletín Científico Tecnológico.

El sustancial cambio en su editorial, la creación de una estructura organizacional diferente a la existente, fueron algunas de las variables tomadas en consideración que permitió llevar a cabo las modificaciones introducidas a partir del presente boletín.



Es así como se destaca en esta edición el cambio de contenido, pasando de una multiplicidad de inserciones académicas, artículos y noticias en general, a una estructura editorial donde su principal contenido se centra en forma radical en la presentación de artículos aportados por una diversidad de escritores y académicos.

Las motivaciones que se tuvo en cuenta para introducir modificaciones al formato que se presenta, fueron analizadas desde la perspectiva de conservar el propósito original que se tuvo al crear el Boletín Científico Tecnológico, manteniendo disponible e inalterable sus páginas para todos quienes en su anhelo por compartir conocimientos, investigaciones, ensayos y otros, encuentren el espacio académico apropiado para hacerlo.

En su lectura, encontrarán los más disímiles artículos escritos por variados autores que tienen como nexo común, el participar en trabajos de investigación, proyectos, estudios y otros temas de carácter militar y civil, que sirven y fomentan el acervo cultural de todos quienes tengan acceso a esta publicación, con el único propósito que los insta en hacerlo, el querer compartir sus logros, experiencias y desarrollos.

Otros de los considerandos tomados en cuenta al adoptar la resolución de modificar la estructura que se presenta, dice relación con la decisión de indexar en un futuro cercano la presente publicación a LATINDEX, que es un sistema regional de información académica, sin fines de lucro y de consulta gratuita, especializado en revistas editadas en Iberoamérica y que opera en 23 países.

En forma coincidente con el lanzamiento de esta nueva versión del Boletín Científico Tecnológico, encontramos a nuestra alma mater, celebrando su nonagésimo aniversario al servicio de la Institución, contribuyendo con su quehacer académico al desarrollo de la capacidad militar y al engrandecimiento y progreso tecnológico de nuestro Ejército.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**GESTIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO
CONVENCIONALES DE GENERACIÓN INTERMITENTE**



GESTIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES DE GENERACIÓN INTERMITENTE

Ste. (Rva.) Juan Carlos Olmedo Hidalgo.¹

Resumen: *En este artículo se efectúa una revisión de la experiencia internacional en la determinación de los costos de integración de energías renovables intermitentes y estacionales a gran escala. Se revisa el potencial efecto en las tarifas al consumidor final de una integración.*

Palabras claves: *Energía renovable no convencional, Costos de integración, Tarificación de electricidad*

Abstract: *This article reviews the international experience in determining the integration costs of intermittent and seasonal renewable energies. It is calculated the effect in electricity tariffs to end user in a scenario of large-scale integration of intermittent renewable energy.*

Key words: *Non-conventional renewable energy, Integration, Costs, Electricity pricing*

1. ANTECEDENTES

Como parte de la estrategia para mitigar los efectos del incremento del calentamiento global por efecto del aumento de gases de efecto invernadero, para el sector energía ha surgido como vía de mitigación la promoción de fuentes de energías renovables. La Agencia Internacional de Energía (IEA) define Energía Renovable como: “Energía renovable es energía que es derivada de procesos naturales [...] que son repuestos a una tasa más rápida de la que son consumidos”.

En Chile se diferencia entre energía renovable convencional, que son aquellas centrales hidroeléctricas de embalse y de pasada superiores a 40 MW, y las energías renovables no convencionales (ERNC) definidas en la normativa del sector eléctrico chileno como las centrales hidroeléctricas menores a 40 MW y aquellas que utilizan como fuente energética biomasa, geotermia, sol, viento y basadas en energía del mar.

¹ Ingeniero Civil Industrial de la Pontificia Universidad Católica de Chile. MBA de la Universidad Adolfo Ibáñez. Actualmente es profesor en programas de postgrado en las Universidades de Chile y Santa María, respectivamente.



Algunas de dichas fuentes de generación presentan características de intermitencia y estacionalidad, como son las tecnologías eólica y solar fotovoltaica.

La incorporación de algunas fuentes de generación que presentan variabilidad relevante a gran escala impone costos en el resto del sistema creando una divergencia entre los costos totales que se impone al conjunto del sistema eléctrico y los que efectivamente perciben quienes desarrollan dichas fuentes de generación. En el corto plazo, el resto del sistema debe ajustarse para dar colocación a dichas fuentes y flexibilizar su operación incurriendo en costos que pueden implicar subsidios cruzados. En el largo plazo, en el caso de no corregir esta distorsión, las señales de inversión se alejarán del óptimo social.

Un principio económico básico, para la correcta asignación de recursos, es que los precios reflejen los verdaderos costos de la generación. En este sentido, la cuota definida por la regulación chilena podría imponer costos al resto del sistema y amenazar el objetivo explícito del gobierno de reducir los precios de la energía eléctrica a consumidor final. La experiencia internacional entrega lecciones sobre la prudencia, gradualidad y aprendizaje que requiere la incorporación a gran escala de capacidad de generación intermitente, y que puede resultar en costos relevantes para el sistema en su conjunto, las empresas y consumidores finales.²

Por otra parte, considerando el objetivo que se persigue en el marco de los acuerdos que se impulsan en la Conference of the Parties, la mitigación de gases efecto invernadero debe abordarse, pero desde una perspectiva tecnológicamente neutral y consistente con las exigencias que se definan en las instancias internacionales pertinentes, de forma tal de no dejar al país en una situación de desventaja frente a los países con que compiten sus exportaciones.

2. LOS COSTOS REALES DE LAS FUENTES INTERMITENTES DE GENERACIÓN

Pérez-Arriaga & Battle (2012) definen una fuente intermitente como aquella con variabilidad no controlable y parcialmente impredecible. Otros autores (Ueckerdt et al., 2013) han destacado además la especificidad de la ubicación como característica clave de estas fuentes. Estos atributos se relacionan directamente con nuevos costos

2 Un caso emblemático es el alemán. En Alemania, la inclusión de generación intermitente apoyada por subsidios explícitos, ha resultado en la disminución del costo marginal medio de 80 €/MWh en 2008 a valores bajo 40 €/MWh en 2013 (Economist, 2013). Sin embargo, los precios a consumidores finales han aumentado alcanzado cifras que llegan a 0.292 €/kWh llevando a cuestionar toda la política energética de ese país. Otro caso interesante de revisar es el español que revirtió subsidios importantes por impactos en el mercado y costos para el Estado.



asociados a la inclusión a gran escala de fuentes renovables en los sistemas de generación. Así, además de los costos asociados a la inversión y operación de las centrales consideradas en el costo de desarrollo,³ se debe incorporar los costos de integración, que surgen del impacto que la generación intermitente ocasiona en el resto del sistema. No incorporar los costos de integración lleva a subestimar los costos reales de las fuentes intermitentes.

La figura N° 1 ilustra el costo de desarrollo de una fuente intermitente y cómo debe asignarse el costo adicional que genera en el resto del sistema para medir correctamente su impacto. Estos son los llamados costos de integración que deben agregarse a los costos de desarrollo de la generación intermitente. Se distingue entre el corto y el largo plazo considerando que la correcta planificación permite acotar y reducir los costos de integración.

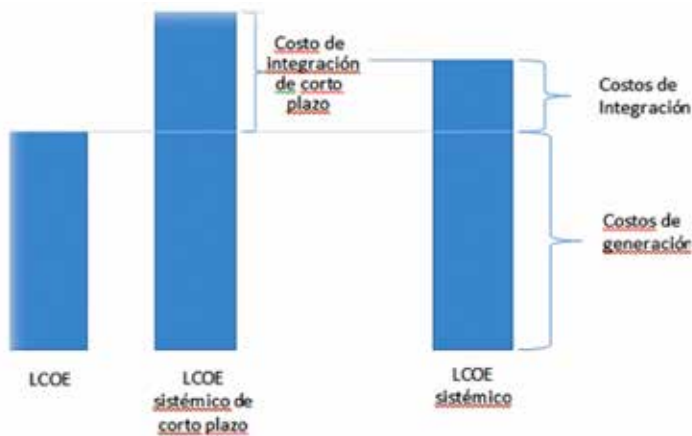


Figura N° 1: Costo de desarrollo (LCOE) y costos de integración.

Fuente: Elaboración propia en base a Ueckerdt et al., 2013.

En general, y sin considerar los costos de integración, los costos de desarrollo de tecnologías intermitentes dependen fuertemente de los parámetros de factor de planta y costo unitario de capital. En particular, al analizar la sensibilidad de los costos de desarrollo de fuentes intermitentes mediante técnicas de simulación, resulta que el factor de planta domina en su contribución a la varianza del indicador de costo por sobre otros parámetros incluyendo el costo de capital. Se desprende entonces que un factor de planta alto es crucial para que el costo de desarrollo resulte bajo.

3 El costo de desarrollo representa aquel pago constante por la energía generada (US\$/MWh) que permitiría financiar el proyecto de generación para todo el horizonte de operación de forma tal de garantizarle un determinado nivel de rentabilidad. Se incluyen categorías de costos de capital, mantenimiento y operacionales (incluyendo combustible).



La elección de parámetros determinará el costo de desarrollo implícito y explica parte importante de las divergencias entre estudios que analizan la incorporación de capacidad renovable.

Respecto de los costos de integración, la literatura suele distinguir al menos tres categorías como se explica a continuación:

2.1 Costos de balance

Esta categoría de costos es una consecuencia de la naturaleza variable y aleatoria de las fuentes de generación intermitentes y de la no imputación adecuada de los servicios complementarios. La generación intermitente exige mayores requerimientos de flexibilidad y adaptación a pesar de restarle estos atributos al sistema cuando se aumenta su participación.

La generación intermitente incrementa la frecuencia de cambios de carga neta en otras centrales generadoras, exigiendo mayor capacidad de respuesta del sistema en distintas escalas temporales, desde minutos a días, demandando ajustes del resto del sistema. Para lograr equilibrar la oferta con la demanda en cada instante, la integración de generación variable impone requerimientos, asociados a costos, de mayor generación flexible, capacidad de reserva y de uso subóptimo de centrales térmicas.⁴

En cuanto a su aporte al sistema, las centrales intermitentes si bien aportan energía, no contribuyen a mejorar la calidad de servicio, pues no contribuyen a reforzar la inercia del sistema, factor muy relevante para contener los efectos de perturbaciones ocasionadas por desconexiones de componentes de generación y/o transmisión del sistema. Actualmente algunos fabricantes están haciendo pruebas con parques eólicos con el propósito de contribuir a la inercia del sistema (Atienza, 2014).

Los servicios complementarios se refieren a aquellos recursos del sistema que se requieren para obtener una operación confiable y con los estándares de calidad requeridos. En Chile, estos servicios son definidos por el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC), los cuales solo pueden ser aplicados una vez que la Comisión Nacional de Energía (CNE) autorice su aplicación. Si bien los servicios complementarios fueron incorporados la Ley Corta I, su implantación ha sido lenta y los mecanismos de aprobación poco efectivos para atender las necesidades del sistema eléctrico. El problema es que

4 Los principales costos en que incurren las centrales térmicas como consecuencia de la operación en la modalidad de ciclado, se relacionan con mayores costos de O&M, ineficiencia en el consumo de combustible y el impacto negativo en emisiones locales y globales.



las centrales eólicas y solares no perciben costos por este concepto, pues estos son socializados entre los demás agentes del mercado, percibiendo así un subsidio cruzado desde ellos. Es importante que los costos sean percibidos por las fuentes intermitentes y, para ello, una opción es que los CDEC tengan la autonomía suficiente para definir e implantar los servicios complementarios que el sistema requiere en forma oportuna y del tipo que sea necesario.

2.2 Costos de perfil de generación

La intermitencia también tiene impactos en los costos del sistema en el largo plazo. Una fuente de generación intermitente con bajo factor de planta no aporta de manera significativa al reemplazo de generación convencional. Esto porque una unidad de generación variable crea incerteza por lo que no es capaz de reemplazar una central convencional.⁵ Por lo anterior, la penetración a gran escala de fuentes intermitentes, puede llevar a reducir los niveles de generación de centrales eficientes para dar cabida a estos incrementos. Incluso sin considerar los costos asociados a la utilización sub óptima de la capacidad térmica, la reducción en las horas de operación de éstas centrales reduce su generación total aumentando el costo medio en el llamado efecto de utilización (Nicolosi 2012).

La figura N° 2 ilustra el efecto de utilización y muestra la forma en que debería modular diariamente su generación una central térmica para dar respaldo a una central eólica y una central solar, de forma de viabilizar el abastecimiento confiable y seguro de la demanda. Esta modulación reduce el factor de planta de la central térmica.

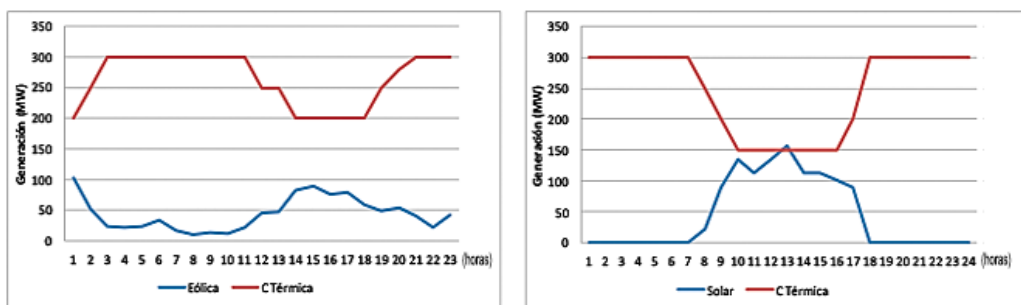


Figura N° 2: Generación horaria de centrales térmicas e intermitente.

Fuente: Elaboración propia.

5 El crédito de capacidad es un indicador sobre el aporte a la confiabilidad de largo plazo (suficiencia) del generador o conjunto de generadores incorporados y suele expresarse en términos porcentuales de la capacidad nominal de una planta. El crédito de capacidad depende de la correlación existente entre la demanda de punta y la generación.



Indiscutiblemente el ajuste en el uso de la central aumenta el costo medio, es decir, cuesta más producir dado que se produce menos energía para costear altos gastos de capital inicial. Hay entonces dos opciones poco auspiciosas en el corto o mediano plazo: se sube el precio o se afecta la rentabilidad de las generadoras convencionales.

En el largo plazo, considerando que el precio de los contratos de suministro a consumidores finales es determinado por el costo medio de desarrollo de una central térmica eficiente, y que el generador no verá afectada su rentabilidad, una primera aproximación para estimar el impacto en precios de una penetración a gran escala de energía solar y eólica se puede hacer considerando que la central térmica hará la modulación de carga o respaldo para dichas centrales.

El efecto en el precio del suministro al cliente final se puede estimar considerando que la central termoeléctrica de expansión debe reducir su factor de planta, desde un 90% o 85% actual, a niveles más bajos dependiendo de la participación que alcancen las fuentes ERNC. De esta manera se observan las bajas en niveles de generación que debe efectuar la central de base para dar cabida a dichas fuentes ERNC, cuyo impacto en costo medio de largo plazo de las centrales térmicas eficientes se muestra en la figura N° 3, lo que representa el precio que llega al consumidor final. Cabe mencionar que solo se han considerado los efectos en el cambio en el factor de planta de la central y no se incluyen otros costos de integración que incrementarían más el precio.

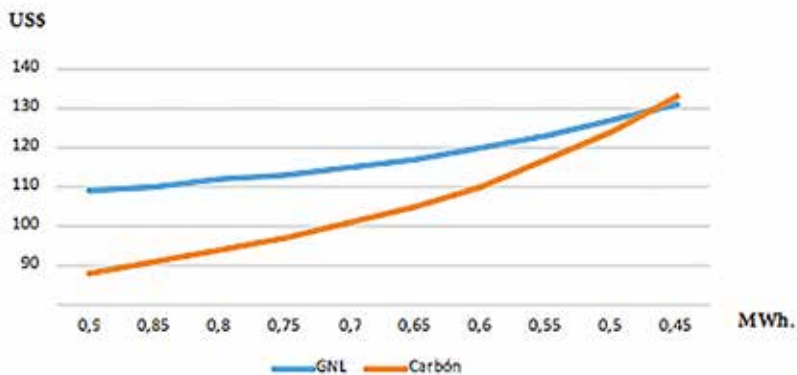


Figura N° 3: Costo de desarrollo US\$/MWh)
Costos de transmisión y de redes

La existencia de bloques de generación con alta estacionalidad e intermitencia aumenta los requerimientos de capacidad del sistema de transmisión. La integración a gran escala de generación variable podría hacer necesarias mayores holguras de capacidad a fin de efectuar modulaciones y transferencias de carga.



En Chile, la incorporación de generación intermitente también se asocia a divergencias en los costos sociales y privados en los pagos de transmisión debido a la forma en que se remunera, en particular la transmisión troncal. La transmisión se cancela en función del uso esperado que hacen las centrales generadoras en un año, es decir, la transmisión se paga en función del factor de planta de cada central generadora. Las centrales intermitentes son altamente demandantes en capacidad de transmisión, tanto para evacuar sus inyecciones como para la modulación que deben hacer las centrales del resto del sistema para dar cabida a estas fuentes. Así, a modo de ejemplo, se tiene que una central eólica o solar fotovoltaica con factor de planta del orden de 30%, sólo pagaría un 30% de los costos de las líneas de transmisión que requiere para efectuar sus inyecciones. Con esto, el 70% de los costos de esas líneas es asignado a la generación convencional y otras ERNC que operan en forma continua, y a los consumidores, con lo cual perciben un subsidio cruzado de parte de estos agentes a las fuentes eólicas y solar fotovoltaica.

3. COSTOS DE INTEGRACIÓN DE GENERACIÓN INTERMITENTE EN CHILE

La ley de promoción de energías renovables no convencionales, o ley 20/25, establece una cuota para Chile que crece gradualmente para la generación renovable no convencional y que debe llegar a 20% en el año 2025. La experiencia internacional ha mostrado la necesidad de abordar ciertos problemas asociados a los costos de la incorporación a gran escala de nueva capacidad de ERNC intermitente sobre la base de los proyectos de generación que disponen de aprobación ambiental, se puede observar que las fuentes intermitentes serían la fuente dominante en la expansión de la capacidad de generación en los próximos años, lo que se puede deducir de la figura N° 4 que muestra los proyectos aprobados y que es posible construir en el período 2015-2018.

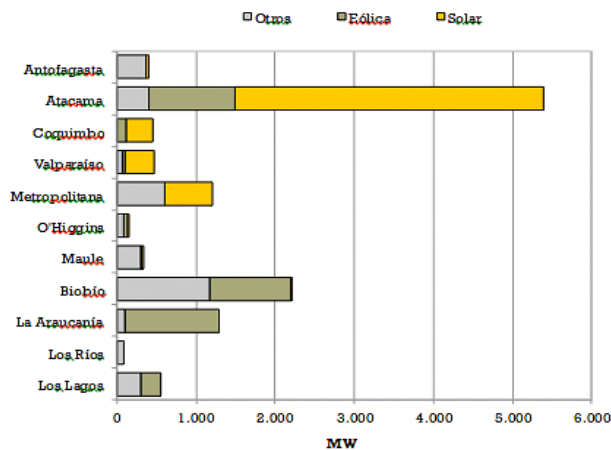


Figura N° 4: Catastro de proyecto de generación ERNC en Chile 2015-2018.

Fuente: CER, SEA, CDEC, CNE. Julio 2015.



De los proyectos ERNC aprobados en el Sistema de Evaluación Ambiental (SEA), aproximadamente el 90% de la capacidad instalada corresponde a proyectos eólicos y solares fotovoltaico de naturaleza intermitente.

Esta distribución en la cartera de proyectos ERNC se debe, por una parte, a que los costos de desarrollo de este tipo de centrales es sustancialmente más bajo que de otras tecnologías ERNC (biomasa, mini hidráulicas, geotermia) y sus plazos de ejecución son más cortos, meses en comparación con años. Por otra parte, la divergencia entre los beneficios y costos reales y los percibidos por las fuentes intermitentes altera las señales de inversión.

A fines del año 2013 la OCDE emitió el informe “Effective carbon prices”, en el cual se estiman los costos de abatimiento incurridos por distintos países miembros incluyendo a Chile. En este informe, la OCDE reporta que los costos de mitigación de emisiones para Chile se estiman en alrededor de 0,05% del PIB (ver figura N° 5), lo cual supera a países como Australia, Brasil, China, Corea, Estados Unidos, Francia y Japón.

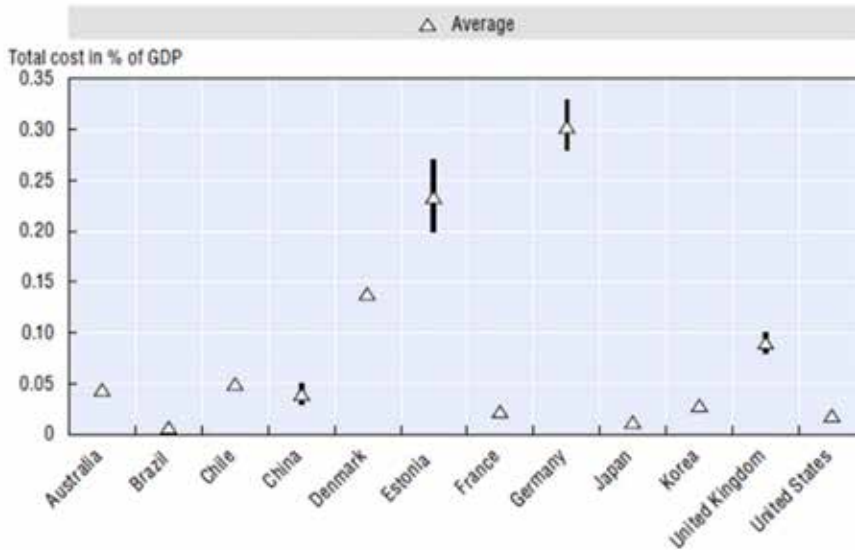


Figura N° 5: Total costs of carbon-related policies applied in the electricity sector in per cent of GDP (Costo de políticas públicas en sector energía eléctrica).

Según las estimaciones de la OCDE, Chile ha abatido en promedio un 10% (5,6% a 14,4%) de las emisiones que habría incurrido respecto del BAU (Business as usual), a través de las políticas aplicadas en el sector eléctrico. Los costos se estiman en 69 millones de euros anuales para la ley ERNC de 2007 y 14 millones de euros anuales para



la exención de pago de peaje troncal a las centrales ERNC. En términos de equivalencia a un costo de abatimiento de las dos políticas mencionadas, el estudio determina un valor de 13 a 65 Eur/ton de CO₂, dependiendo del nivel de abatimiento de CO₂.

Así, sería esperable que la meta de ERNC a 20% al año 2025 implicaría costos adicionales a los estimados por la OCDE en 2013.

Otros estudios han llegado a conclusiones similares, como es el caso de un estudio de Alexander Galetovic y Cristián Hernández para la Cámara Chilena de la Construcción en 2012, en el cual sostienen que el cumplimiento de la cuota de 20% de generación renovable podría significar un costo anual en torno a US\$ 500 millones.

4. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO COMO MITIGANTES DEL COSTO DE INTEGRACIÓN

Como se ha señalado previamente, la intermitencia y estacionalidad implica disponer de centrales generadoras que puedan proveer la energía que no generan dichas centrales en las horas que el sistema eléctrico lo requiere.

Con el desarrollo tecnológico actual, las alternativas de que se dispone para realizar esto son la generación de respaldo mediante tecnologías de generación térmica flexible, turbinas a gas y centrales de embalse. Además, existen los mecanismos de almacenamiento de energía, lo que se puede hacer mediante sistemas de baterías (battery energy storage system), centrales hidroeléctricas de bombeo⁶ y almacenamiento de gas en gasoductos incrementando transitoriamente la presión de trabajo.

En la tabla N° 1 se describe cada una de las alternativas mencionadas.

La alternativa más eficiente para este propósito son las centrales hidroeléctricas de embalse, seguido por las centrales termoeléctricas flexibles y almacenamiento en gasoductos.

Las tecnologías de almacenamiento mediante baterías aún presentan altos costos que superan con creces los costos de centrales de embalse. Así, será relevante el desarrollo de tecnologías de almacenamiento mediante baterías, siendo una de las alternativas de investigación el uso de baterías de electrolitos.

6 Son centrales hidroeléctricas que en horas de alta disponibilidad de generación bombean agua hasta un embalse, el cual en las horas en que la demanda aumenta y/o la generación intermitente no está disponible generan electricidad. Este proceso tiene eficiencias energéticas en torno a 80%.



Tabla N° 1: Mecanismos de gestión de la intermitencia.

ALTERNATIVA	APORTE	TARIFICACIÓN	COSTO
Embalses	Permiten proveer energía, potencia de punta y rampas.	Bajos requerimientos de remuneración adicional, pues sistema tarifario la viabiliza. Necesita transmisión adicional.	Bajo
Turbinas a gas	Rampas en tiempos de 15 minutos aproximadamente.	Puede requerir remuneración adicional dependiendo del esquema de potencia firme. Operación se paga por costo marginal de energía.	Alto
Almacenamiento con baterías (BESS)	Permiten rampas en tiempos muy breves, regulación de frecuencia y tensión.	Se puede establecer como exigencia de NTCSS o como esquema de remuneración adicional.	Medio
Almacenamiento en gasoductos	Se puede utilizar el gasoducto para acumular gas natural por incremento de presión. Puede proveer rampas.	Requiere remuneración adicional por gestión de gasoducto. Se debería remunerar capacidad de generación térmica adicional y/o costos adicionales de O&M.	Medio
Tecnologías de generación térmica flexible	Diseños especiales de calderas y turbinas permiten proveer rampas.	Requiere remuneración adicional para solventar mayores costos de O&M.	Medio
Centrales de bombeo	Provee rampas mediante centrales hidroeléctricas turbo-bomba.	Sistema tarifario remunera su aporte por diferencial de costos marginales de energía y remuneración de potencia.	Alto

5. CONSIDERACIONES FINALES

La aplicación de un instrumento regulatorio es deseable desde la perspectiva social en la medida que sus beneficios sean mayores que sus costos, es decir, si se asocian



a un mayor bienestar para el conjunto de la sociedad. Por lo tanto, una política que busque aumentar significativamente la penetración de ERNC será deseable siempre que los costos del instrumento resulten menores que sus beneficios, incluyendo por ejemplo externalidades ambientales, por lo que la meta de inclusión de ERNC es un tema delicado y determinante.⁷

Asumiendo que la cuota ERNC debe ser implementada, lo que queda es hacer cumplir la ley a mínimo costo. Para ello, es crucial que los generadores con características intermitentes internalicen los costos que su inclusión ocasiona en la operación del sistema eléctrico en conjunto y reflejen sus verdaderos costos de generación. Sólo así habrá convergencia en los costos privados que perciben las fuentes intermitentes y los costos sociales que efectivamente asume el sistema.

El regulador debe anticipar impactos potenciales en el sistema para garantizar la oferta de energía a precios competitivos mediante la planificación estratégica e incorporación gradual de fuentes intermitentes y así reducir los costos de ajuste asociados a tal penetración. En este sentido, reflejar los costos reales de todas las fuentes de generación es clave para acotar los costos de inversión y operación del sistema de generación-transporte y no desfavorecer otras tecnologías convencionales y ERNC. La correcta imputación de costos permite que las decisiones privadas de inversión en generación coincidan con aquellas que minimizan el costo de generación posibilitando precios competitivos.

Finalmente, desde una perspectiva tecnológica se debe promover las tecnologías de generación que permitan efectuar gestión de la intermitencia de la generación renovable al menor costo posible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Atienza, Luis (Noviembre de 2014), "La integración de las energías renovables en el sistema eléctrico español", Seminario de integración de energía no convencional y convencional, Santiago, Chile.
- [2] Der Spiegel. (2013). Germany's Energy Poverty: How electricity became a luxury good. Der Spiegel.

⁷ Por supuesto que, en la medida que existan barreras no económicas que hacen que proyectos rentables no se realicen, entonces sí deben existir mecanismos que ayuden a superarlas. Esto último, ya que es deseable que estos proyectos se concreten.



- [3] EURELECTRIC, The Union of the Electricity Industry. (2010). Integrating Intermittent Renewables Sources into the EU Electricity System by 2020: Challenges and Solutions (Inf. Téc.). Brussels: EURELECTRIC.
- [4] Joskow, P.L. (2011). "Comparing the costs of intermittent and dispatchable electricity generating technologies". *The American Economic Review*, 101(3), pp.238–241.
- [5] Hillestad, R. (2000). Competitive jolt. *Rand Review*, 24, 20-23.
- [6] Hirth, L. (2012). Integration Costs and the Value of Wind Power. Thoughts on a valuation framework for variable renewable electricity sources. Available at: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2187632.
- [7] Holttinen, H., Meibom, P., Orths, A., Lange, B., O'Malley, M., Olav Tande, J., van Hulle, F. (2011). Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration. *Wind Energy*, 14, 179-192.
- [8] Mills, A., Wiser, R., y Porter, K. (2009). The cost of transmission for wind energy: A review of transmission planning studies. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Environmental Energy Technologies Division.
- [9] Nicolosi, Marco (2012): The Economics of Renewable Electricity Market Integration. An Empirical and Model-Based Analysis of Regulatory Frameworks and their Impacts on the Power Market, Ph.D. thesis, University of Cologne.
- [10] OECD (2013), *Effective Carbon Prices*, OECD Publishing. DOI: 10.1787/9789264196964-en
- [11] Pérez-Arriaga, I.J., Batlle, C. (2012). Impacts of intermittent renewables on electricity generation system operation, *Economics of Energy & Environmental Policy*.1 (2), 3-17.
- [12] The Economist. (2013, julio). Renewable energy in Spain: The cost del sol. *The Economist*, 57-58.
- [13] Ueckerdt, Falko, Lion Hirth, Gunnar Luderer & Ottmar Edenhofer (2013): "System LCOE: What are the costs of variable renewables?", *Energy* 63, 61-75.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**CUANTIFICACIÓN PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD
DE MARCHA EN MONTAÑA DEL COMBATIENTE
INDIVIDUAL**



CUANTIFICACIÓN PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE MARCHA EN MONTAÑA DEL COMBATIENTE INDIVIDUAL

CAP. Danilo Contador Rojas.¹

Sr. Eduardo Araya Barrios.²

MAY. Claudio Nieto J.³

Sra. Daniela Cárdenas Astudillo.⁴

Sr. Angelo Zaio Rosas.⁵

Resumen: Este artículo realiza un estudio teórico del gasto calórico y la intensidad (%VO₂max⁶) que presentaría un combatiente individual en las diferentes marchas que realizan las unidades de montaña, a través de ecuaciones que estiman el gasto energético en situaciones de marcha. Los resultados indican que el consumo energético necesario para estas marchas varía entre 3.400 [kcal] a 5.500 [kcal].

Palabras claves: Combatiente individual, Gasto calórico, Marchas, VO₂max

Abstract: This article makes a theoretical study of caloric expenditure and intensity (% VO₂max) would present an individual combatant in the different gears that perform Mountainside units through equations that estimate energy expenditure in driving situations. The results indicate that the energy consumption required for these gears varies between 3.400 [kcal] 5.500 [kcal].

Key Word: Individual Combatant, Caloric Expenditure, Gears, VO₂max

1. INTRODUCCIÓN.

El personal militar debe poseer varias capacidades esenciales para ser considerado apto para el combate, una de ellas es la capacidad de marchar. El combatiente individual debe ser capaz de desplazarse por distintos terrenos y poder cargar su equipamiento para ejecutar diversas tareas de combate.

1 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas Tecnología de Información y Comunicaciones.

2 Ingeniero Físico del Departamento de Investigación para el Combate.

3 Magíster en medicina deportiva y ciencias del deporte.

4 Profesora de Educación Física. Magíster en entrenamiento deportivo.

5 Profesor de Educación Física. Magíster (c) en ciencias del ejercicio.

6 El VO₂max es la cantidad máxima de oxígeno (O₂) que el organismo puede absorber, transportar y consumir en un tiempo determinado.



En este artículo para cuantificar la capacidad de marcha del soldado se utilizaron ecuaciones que tratan de predecir el gasto energético en situaciones de marcha [1] [2][3]. El gobierno australiano y la organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) ya han recurrido a este tipo de ecuaciones para realizar sus respectivos análisis sobre marchas [4][5]. De las ecuaciones se pueden obtener el gasto calórico y la intensidad como un porcentaje (%) del $\dot{V}O_{2max}$ del soldado de manera indirecta.

El gasto calórico es la energía que se utiliza para realizar las distintas marchas, y la intensidad permite dar una noción sobre los distintos sistemas energéticos (grasas, glucógeno y fosfatos) que predominan en los diferentes instantes de tiempo de cada marcha para entregar la energía requerida.

Según Kent Sahlin [6] a bajas intensidades, aproximadamente bajo el 50% del $\dot{V}O_{2max}$, la duración de la actividad física puede ser muy larga, debido a que la grasa almacenada en el cuerpo puede proporcionar toda la energía para la tarea realizada, siendo así difícil de determinar un punto de fatiga. A intensidades entre 60% y el 90% del $\dot{V}O_{2max}$, la fatiga está asociada principalmente a la disminución de glucógeno, por lo tanto la capacidad para realizar la marcha del soldado depende del nivel de glucógeno (carbohidratos) en los músculos de este y de la tasa a la que disminuye el glucógeno. A intensidades sobre el 90% del $\dot{V}O_{2max}$, la fatiga está caracterizada por un marcado vaciamiento del ATP (fosfatos de altas energías).

Todo lo anterior se puede ver reflejado en la figura N° 1, la cual muestra la estimación de la duración durante un ejercicio de bicicleta. Aunque la figura no sea precisamente sobre un ejercicio de marcha, esta entrega una noción de la relación entre la intensidad y el tiempo de duración de un ejercicio físico.

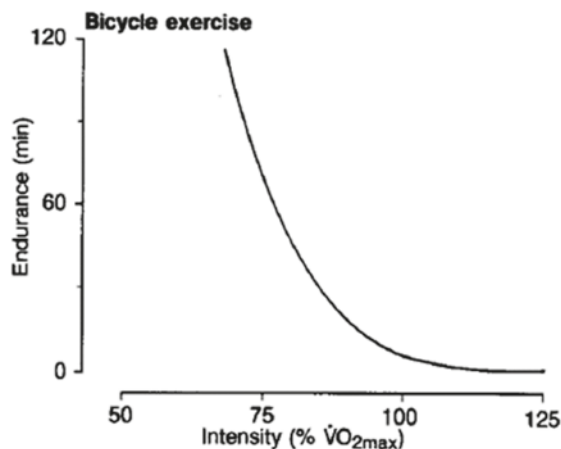


Figura N° 1: Estimación de la duración durante un ejercicio de bicicleta en relación a la intensidad del trabajo [6].



Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.

En este artículo se analizaron marchas que realizan las unidades de montaña. Estas marchas son las siguientes:

a. Marchas III división de montaña:

- Antuco
- Llafenco de ida y regreso

b. Marchas curso de montaña:

- Cristo Redentor
- Mocoen
- Ojos de Agua

1.1 Marcha de Antuco.

Esta marcha es en la región del Biobío y tiene una distancia aproximada de 19,4 km. En la figura N° 2 se presenta una imagen del recorrido en el cual se señala el punto de inicio de marcha (PIM) y el punto de término de marcha (PTM).



Figura N° 2: Imagen del terreno por el cual se realiza la marcha de Antuco.



1.2 Marcha de Llafenco.

Esta marcha es en la región de la Araucanía y tiene una distancia aproximada de 23,6 km. En la figura N° 3 solo se muestra la ida del recorrido, ya que el regreso es la misma ruta pero iniciando la marcha desde el punto de término de marcha.



Figura N° 3: Imagen del terreno por el cual se realiza la marcha de Llafenco de ida.

1.3 Marcha del Cristo Redentor.

Esta marcha es en la región de Valparaíso y tiene una distancia aproximada de 9,3 km de pendiente constante. En la figura N° 4 se presenta una imagen del recorrido en el cual se señala el punto de inicio de marcha y el punto de término de marcha.



Figura N° 4: Imagen del terreno por el cual se realiza la marcha del Cristo.



Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.

1.4 Marcha de Mocoen.

Esta marcha es en la región de Valparaíso y tiene una distancia aproximada de 8,1 km. En la figura N° 5 se presenta una imagen del recorrido en el cual se señala el punto de inicio de marcha y el punto de término de marcha.



Figura N° 5: Imagen del terreno por el cual se realiza la marcha de Mocoen.

1.5 Marcha de Ojos de Agua.

Esta marcha es en la región de Valparaíso y tiene una distancia aproximada de 12 km. En la figura N° 6 se presenta una imagen del recorrido en el cual se señala el punto de inicio de marcha y el punto de término de marcha.



Figura N° 6: Imagen del terreno por el cual se realiza la marcha de Ojos de Agua.



2. DESARROLLO

Para el desarrollo de este artículo se calculó: el gasto energético, los macronutrientes y la intensidad (% de VO₂max) del combatiente individual. El método de cómo se hicieron los cálculos se muestra a continuación, junto con las variables utilizadas para realizar todos los cálculos.

2.1 Gasto energético.

Las rutas de marcha fueron divididas por tramos, en donde cada tramo es de tamaño variable, y cada uno de estos posee un grado de inclinación en %, ya sea de subida o bajada. En cada tramo se calculó el gasto calórico en kcal y luego a través de la suma de todos los tramos, se obtuvo la cantidad total del gasto calórico en cada marcha. El cálculo de las kcal en cada tramo se realizó mediante la ecuación de Pandolf y otros [1]. Esta ecuación es una de las más relevantes para determinar el costo energético para una marcha según trabajos de revisión [4][5][7]. La ecuación es la siguiente:

$$M = 1.5 \times W + 2.0 \times (W + L) \times \left(\frac{L}{W}\right)^2 + \eta \times (W + L) \times [1.5 \times V^2 + 0.35 \times V \times G] \quad (1)$$

En donde:

M= tasa metabólica, [Watts].

W= peso del sujeto, [kg].

L= peso de la carga, [kg].

V= velocidad de la marcha, [m/s].

G= grado de inclinación, [%].

η = factor del terreno (Estos factores están predeterminados, por ejemplo: asfalto=1,0; arena suelta= 2,1).

La ecuación anterior no toma en cuenta el incremento del costo energético que se produce en períodos extensos de tiempo (más de dos horas), por lo que el costo energético podría ser subestimado (~10%-16%)[8][9]. Además esta ecuación fue desarrollada en pendientes positivas con inclinación de entre 0 a 25 %. Por lo tanto si se quiere calcular el costo energético en pendientes negativas se debe aplicar un factor de corrección [2]:

$$CF = \eta \times \left[\frac{G \times (W + L) \times V}{3.5} - \frac{(W + L) \times (G + 6)^2}{W} + (25 - V^2) \right] \quad (2)$$



Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.

Luego para bajadas el costo energético se calcula como:

$$\text{Costo energético} = M - CF \quad (3)$$

Sin embargo esta corrección pareciera no funcionar bien para velocidades distintas a 1,34 m/s, y fue desarrollada en declinaciones de hasta -12 %, por lo que para bajadas se opta por usar otra ecuación, fórmula adaptada de Santee y otros [3].

$$W_{Downn} = W_L + 2.4 \times (m_t \times g \times h/s) \times 0.3^{(\alpha/7.65)} \quad (4)$$

En donde:

W_L = es el costo energético sin inclinación, el cual en este caso es obtenido de la ecuación (1).

m_t = es el total de la masa en kilogramos (considerando el peso de la persona y la carga).

g = es la aceleración de gravedad 9,8 m/s².

h = es el desplazamiento vertical a una velocidad dada en m/s para cierto grado.

s = distancia.

α = es el ángulo de la inclinación.

Esta ecuación expresa el gasto energético de la marcha, gasto que disminuye con la declinación del terreno. Existe también un ángulo óptimo de declinación y cuando este ángulo es sobrepasado, el costo energético vuelve a elevarse aunque sin sobrepasar el requerimiento calórico de la marcha sin inclinación.

Las velocidades a pie para marchas en montaña en terreno sin nieve, según el manual de técnicas de montaña del Ejército de Chile [10], se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N° 1: Velocidades en metros por hora [m/h] de distancias verticales para marchas en montaña a pie en terreno sin nieve.

CARGA [kg]	TROPA NORMAL [m/h]		TROPA ANDINA [m/h]	
	Subida	Bajada	Subida	Bajada
10	300-350	600	450-550	700
20	250-300	500	350-450	550
30	200-250	350	250-350	400



Se usaron como referencia los tiempos de desfile del manual de técnicas de montaña del Ejército de Chile (tabla N° 2) para definir las velocidades utilizadas en este artículo.

Tabla N° 2: Tiempo de desfile para distancia vertical de 350 m/h.

PROFUNDIDAD [m]	PENDIENTES				
	10 %	15%	20%	25%	30%
1000	13'20"	20'	28'20"	33'20"	41'40"

El resultado del costo energético que se calcula de las ecuaciones se obtiene en watts, ya sea en subida o bajada, este se puede transformar en kcal/h y ya que los tramos de las marchas se realizan a las velocidades especificadas en la tabla N° 3, y se conoce la distancia de los tramos, se puede calcular el tiempo en que se recorre cada tramo. Al tener el tiempo se puede obtener la cantidad de kcal de cada tramo para finalmente hacer la suma de todas las distancias y así obtener el gasto energético de la marcha.

Tabla N° 3: Tabla de velocidades según la inclinación de los tramos de las rutas de marcha.

PENDIENTE [%]	VELOCIDAD [km/h]
< (-84)	1,2
(-84)-(-58)	3
(-58)-0	6
0-10	5
10-15	4,5
15-20	3
20-25	2,5
25-30	2
30-35	1
35-40	0,93
40-45	0,93
> 45	0,4



En la tabla N°3 las pendientes positivas varían en saltos de 5 %, sin embargo para las pendientes negativas el salto resulta ser irregular. Esto se debe a que las pendientes negativas fueron tomadas como grados y luego se pasaron a porcentaje. Por ejemplo el valor de 84 % proviene de pendiente con 40 grados de declinación.

Luego de haber obtenido el gasto energético de la marcha, se puede calcular el gasto energético diario del soldado, según la suma de las actividades físicas que este realiza durante el día. Es decir, el gasto metabólico basal + el gasto de la marcha + el gasto del resto de las actividades (este último por el momento se omitirá en este artículo, al no saber el detalle de las actividades que se realizan). El gasto metabólico basal (TMB) se calcula a través de la ecuación de Harris-Benedict [11]:

$$TMB(\text{hombres}) = [10 \times \text{peso}(\text{kg})] + [6.25 \times \text{altura}(\text{cm})] - [5 \times \text{edad}(\text{años})] + 5 \quad (5)$$

A continuación de tener el gasto energético diario, se puede calcular el déficit energético diario que el soldado presenta, en donde:

$$\text{Déficit de energía diario} = \text{gasto de energía diario} - \text{consumo de energía diario} \quad (6)$$

Para el consumo de energía diario, en este artículo usaremos la minuta de montaña 2015 para el Ejército de Chile [12], la cual de aquí en adelante se le referirá como minuta. La minuta es alimentación que recibe el soldado diariamente, la cual tiene una cierta cantidad de kcal y macronutrientes específica.

Se puede considerar que un individuo pierde una libra⁷ por cada 3.500 kcal que ha este le faltan. Si se tiene un individuo que pesa 77 kg, lo equivalente a 171,1 libras, el 10% de su peso serían 17,1 libras. Con estos datos se puede calcular en cuantos días esta persona pierde el 10% de su peso según el déficit de energía que esté presente diariamente, esto se hace de la siguiente manera:

$$17,1 \text{ libras} \times 3.500 \text{ kcal} = \text{déficit de energía} \times \text{días} \quad (7)$$

$$\text{días} = \frac{17,1 \text{ libras} \times 3.500 \text{ kcal}}{\text{déficit de energía}} \quad (8)$$

Con los días en los que el individuo pierde el 10% de su peso, se utiliza la tabla N° 4 para determinar si el individuo podría tener un posible impacto en su rendimiento.

⁷ 1 libra = 0,45 kg

**Tabla N° 4: Causas probables de pérdida de peso y su impacto potencial en el rendimiento [13].**

PÉRDIDA DE PESO PROMEDIO	PERÍODO DE TIEMPO	CAUSA PROBABLE	IMPACTO POTENCIAL EN EL RENDIMIENTO
>10%	Menos que 48 horas	Consumo inadecuado de fluidos	Serio déficit
	3 días a 12 semanas	Severo déficit de energía	Muy probable
	12 semanas o mas	Déficit de energía	Poco probable

2.2 Macronutrientes.

Para analizar las cantidades de macronutrientes se utiliza las recomendaciones de Australia y Nueva Zelanda usadas en el anexo J del artículo: Nutrition Science and Food Standards for Military Operations [14].

Tabla N° 5: Recomendaciones de Australia y Nueva Zelanda para el consumo de macronutrientes [14].

RECOMENDACIONES AUSTRALIA Y NUEVA ZELANDA	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE MACRONUTRIENTES
Proteínas	15-25
Hidratos de Carbono	45-65
Lípidos	20-35

2.3 Intensidad (% de VO2max).

Una vez obtenido el gasto energético y macronutrientes diario, se analiza el % de VO2max de cada tramo de la marcha. Mediante la ecuación (1), si se asume que 5 kcal equivalen a 1 litro de oxígeno (\dot{V}_{O_2}), se puede obtener el consumo de oxígeno en L/min de cada tramo de esta marcha. Con el consumo de oxígeno se puede estimar la intensidad de esta marcha como un % del VO2max, lo cual se hace dividiendo el consumo de oxígeno por el VO2max del individuo y multiplicando por 100. El VO2max es estimado a través de la cartilla para las pruebas de suficiencia física del Ejército de Chile [15], tomando como referencia el tiempo para la clasifi-



Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.

cación de “apto” en personas de 30 a 34 años en esta prueba (carrera de 2.400 metros). **Nota:** una consideración importante que se debe tener en cuenta, es que el VO₂max disminuye considerablemente cuando se marcha con peso [16], por lo tanto el valor del %VO₂max puede estar sobreestimado.

Ya con el resultado de la intensidad de la marcha, se utiliza un modelo obtenido por Wu & Wang [17], para estimar el tiempo en que se puede sostener la marcha de manera continua en cada tramo. El modelo se traduce como la siguiente ecuación:

$$\text{Horas} = 95.33 \times e^{-7.28 \times \%VO2max} \quad (9)$$

Este tiempo es de interés para tramos a intensidades sobre el 100% del VO₂max, ya que la actividad física a esas intensidades se pueden mantener por breves períodos de tiempo y al ser tramos pequeños los que se analizan, los tiempos en que se recorren también son pequeños. Por lo tanto, es de interés saber si la persona es capaz de recorrer cada tramo dentro del período de tiempo aceptable, según la ecuación (9).

2.4 Variables del modelo.

Para realizar todos los cálculos con las ecuaciones presentadas en esta sección, se utilizaron datos promedio del Ejército de Chile, los cuales se observan en la siguiente tabla:

Tabla N° 6: Valores del soldado promedio y datos usados para realizar los cálculos.

VARIABLES	VALORES
Altura del soldado	171 cm ± 8 cm
Edad del soldado	30 años
Peso del soldado	77 kg ± 11 kg
Peso de la carga	33 kg
Velocidad del soldado	Según tabla N° 1
Factor del terreno	1,1 (camino de tierra)
Pendiente	Varía según el tramo del perfil topográfico
VO ₂ max	3,66 l/min

En los cálculos no se consideró el sector geográfico, es decir no se tomó en cuenta condiciones de hipoxia y climatológicas, las cuales son condiciones que podrían variar



el gasto energético. Por lo tanto la altura y la temperatura no son variables de consideración para el análisis de este artículo.

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan todos los resultados obtenidos, empezando por el gasto energético.

3.1 Gasto energético.

Los resultados del gasto calórico de cada marcha se presentan en la tabla N° 7:

Tabla N° 7: Gasto energético y tiempo de duración de las marchas realizadas por las unidades de montaña.

MARCHAS	kcal	TIEMPO [h]
Antuco	2.248,91	3,8
Cristo	1.757,38	2,7
Mocoen	2.732,08	5,2
Ojos de Agua	3.540,45	6,8
Llafenco ida	3.872,17	6,3
Llafenco regreso	3.688,30	6,1

Se obtuvo de la ecuación (5) que la tasa metabólica basal es de 1.696,81 kcal y además se posee el gasto energético diario de las distintas marchas, por lo tanto se puede obtener el gasto energético total diario:

$$\text{Gasto energético total diario} = \text{Tasa Metabólica basal} + \text{Marcha} \quad (10)$$

Luego el gasto energético para todas las marchas, se muestran en la tabla N° 8:

Tabla N° 8: Gasto energético diario para cada una de las marchas y el valor energético entregado por la minuta.

MARCHAS	kcal
Antuco	3.945,72
Cristo	3.454,19



Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.

MARCHAS	kcal
Mocoen	4.428,89
Ojos de Agua	5.237,26
Llafenco ida	5.568,98
Llafenco regreso	5.385,12
Minuta	2.878

3.2 Macronutrientes.

Los resultados de los macronutrientes recomendados para cada marcha son descritos en la tabla N° 9:

Tabla N° 9: Macronutrientes recomendados para cada marcha y los entregados por la minuta.

MARCHAS	PROTEÍNAS [g]	CARBOHIDRATOS [g]	LÍPIDOS [g]
Antuco	148,0 -246,6	443,9 – 641,2	87,7– 153,4
Cristo	129,5 – 215,9	388,6 – 561,3	76,8 – 134,3
Mocoen	166,1 – 276,8	498,2 – 719,7	98,4 – 172,2
Ojos de Agua	196,4 – 327,3	589,2 – 851,1	116,4 – 203,7
Llafenco ida	208,8 – 348,1	626,5 – 905,0	123,7 – 216,6
Llafenco regreso	201,9 – 336,6	605,8 – 875,1	119,7 – 209,3
Minuta	112,3	455,6	60

3.3 Déficit de energía.

Se calcula el déficit de energía diario que tendría el soldado consumiendo la minuta y en cuanto tiempo perderían el 10% de su peso corporal para cada marcha. Sus resultados se observan en la tabla N° 10.



Tabla N° 10: Déficit energético diario y la cantidad de semanas en las que el soldado perdería el 10% de su peso corporal.

MARCHAS	DÉFICIT DE ENERGÍA DIARIO	SEMANAS APROXIMADAS EN QUE EL SOLDADO PIERDE EL 10% DE SU PESO CORPORAL
Antuco	1.067,72	8
Cristo	576,20	13
Mocoen	1.550,89	6
Ojos de Agua	2.359,26	4
Llafenco ida	2.690,99	3
Llafenco regreso	2.507,12	3

Al tener las semanas aproximadas en que se pierde el 10% del peso corporal del soldado, se puede usar la tabla N° 11 para obtener que tan probable sea que el soldado tenga un impacto en su rendimiento físico.

Tabla N° 11: Causas probables de pérdida de peso y su impacto potencial en el rendimiento [13].

PÉRDIDA DE PESO PROMEDIO	PERÍODO DE TIEMPO	CAUSA PROBABLE	IMPACTO POTENCIAL EN EL RENDIMIENTO
>10%	Menos que 48 horas	Consumo inadecuado de fluidos	Serio déficit
	3 días a 12 semanas	Severo déficit de energía	Muy probable
	12 semanas o más	Déficit de energía	Poco probable

Se puede observar que en todas las marchas, excepto en la marcha del Cristo, es muy probable que el soldado tenga un impacto en su rendimiento físico.

3.4 Análisis según % de VO₂max.

En esta sección se analiza el % de VO₂max que se obtiene durante todo el recorrido de cada marcha.



Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.

3.4.1 Marcha de Antuco.

Observando la figura N° 7, se puede notar que la mayor parte de la marcha se realiza bajo el 50% del VO₂max, por lo tanto se podría pensar que la mayor parte de la energía utilizada para realizar esta marcha es obtenida de las reservas de grasa del cuerpo. El resto de la marcha se realiza principalmente entre intensidades del 50% y el 80% del VO₂max.

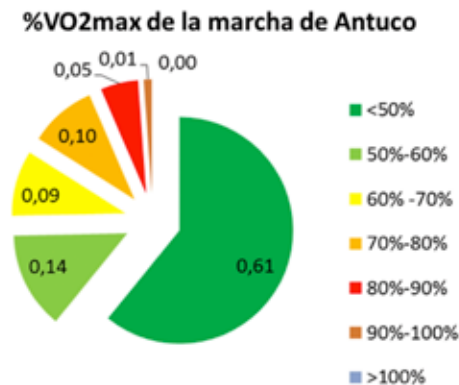


Figura N° 7: Representación gráfica de los porcentajes de las intensidades utilizadas para realizar la marcha de Antuco.

3.4.2 Marcha del Cristo Redentor.

La marcha del Cristo Redentor se puede notar que es bastante más intensa que la marcha de Antuco, según la figura N° 8. En donde la mayor parte de la marcha se realiza sobre el 50% del VO₂max, por lo que podría ser importante una buena fuente de carbohidratos para esta marcha.

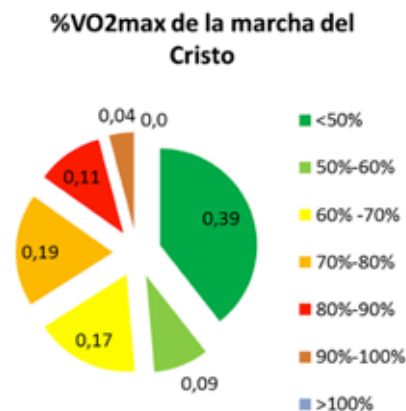


Figura N° 8: Representación gráfica de los porcentajes de las intensidades utilizadas para realizar la marcha del Cristo Redentor.



3.4.3 Marcha de Mocoen.

Se puede notar que según la figura N° 9, esta marcha es muy similar en intensidad a la marcha del Cristo, por lo cual seguramente en esta marcha la alimentación e hidratación sean un factor importante en las condiciones en que se completa esta marcha.

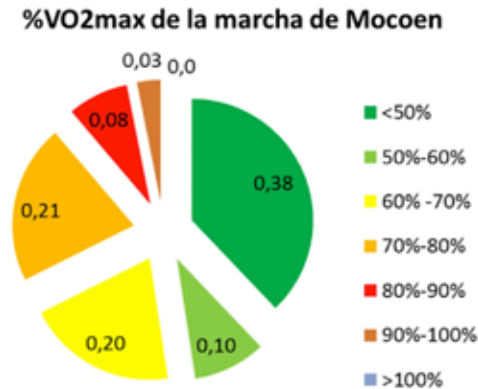


Figura N° 9: Representación gráfica de los porcentajes de las intensidades utilizadas para realizar la marcha de Mocoen.

3.4.4 Marcha de Ojos de Agua.

Al igual que los dos casos anteriores esta marcha resulta ser intensa (ver figura N° 10), y además se le debe añadir que esta marcha es más extensa que las dos anteriores.

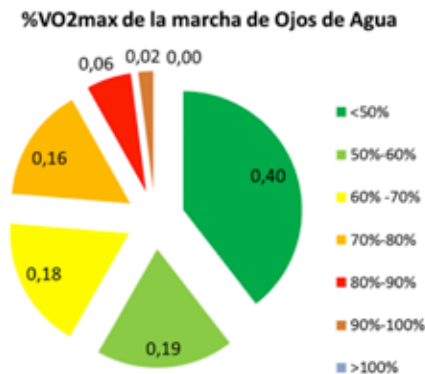


Figura N° 10: Representación gráfica de los porcentajes de las intensidades utilizadas para realizar la marcha de Ojos de Agua.



3.4.5 Marcha de Llafenco de ida.

En la figura N° 11, se puede observar que prácticamente la mitad de esta se realiza bajo el 50% del VO₂max, y el resto a intensidades superiores. Se debe notar que a pesar de no ser una marcha tan intensa como Cristo, Mocoen y Ojos de Agua, esta es bastante más extensa, cerca de los 24 km. Por lo tanto los requerimientos energéticos podrían ser mayores que las marchas mencionadas anteriormente.

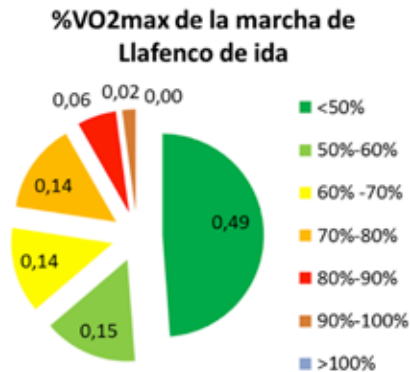


Figura N° 11: Representación gráfica de los porcentajes de las intensidades utilizadas para realizar la marcha de Llafenco de ida.

3.4.6 Marcha de Llafenco de regreso.

Esta marcha es la misma que la anterior solo que de regreso, por lo tanto, estas dos deberían ser similares. Aún así se puede notar que la marcha de regreso es menos intensa que la de ida (figura N° 12).

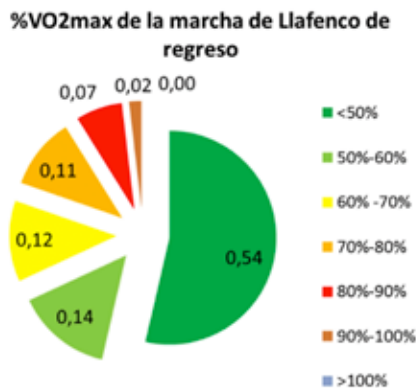


Figura N°12: Representación gráfica de los porcentajes de las intensidades utilizadas para realizar la marcha de Llafenco de regreso.



3.5 Perfiles topográficos según el porcentaje (%) de VO₂max.

Todas las marchas tienen su perfil topográfico y según su perfil depende bastante la dificultad de realizar cada marcha. En este artículo se muestran los perfiles de cada marcha y representados con colores el (%) de VO₂max que se utiliza para recorrer cada tramo. Un punto importante que cabe destacar primero, es que existe un factor de escala entre el eje Y (elevación) con respecto al eje X (distancia), se menciona esto para evitar confusiones, ya que un terreno podría parecer con mayor pendiente de lo que es realmente.

Los perfiles están graficados con 7 colores que representan la intensidad del tramo:

- El color verde oscuro representa tramos realizados bajo el 50% del VO₂max.
- El color verde claro representa tramos realizados entre el 50% y el 60% del VO₂max.
- El color amarillo representa tramos realizados entre el 60% y el 70% del VO₂max.
- El color naranja representa tramos realizados entre el 70% y el 80% del VO₂max.
- El color rojo representa tramos realizados entre el 80% y el 90% del VO₂max.
- El color café representa tramos realizados entre el 90% y el 100% del VO₂max.
- El color azul representa tramos realizados sobre el 100% del VO₂max.

Adicionalmente se añaden cruces (X) a lo que en este caso se denominarán “estado crítico”, lo cual corresponde a tramos realizados sobre el 100% y en donde el tiempo en que la persona demora en recorrer el tramo, es superior al tiempo que la persona puede mantener la intensidad de ese tramo, según la ecuación (9).

En todas las marchas debido a las velocidades elegidas en la tabla N° 3, no ocurren tramos que se realicen sobre el 100% del VO₂max, por lo tanto tampoco hay estado crítico.

3.5.1 Marcha de Antuco.

En la figura N° 13 se puede observar que la mayor parte de la marcha se realiza bajo el 50% del VO₂max. Las intensidades a las que se realiza esta marcha se puede observar que están uniformemente distribuidas, por lo que si el soldado pasa por un tramo a altas intensidades, luego se puede recuperar en los tramos de más baja intensidad.



Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.

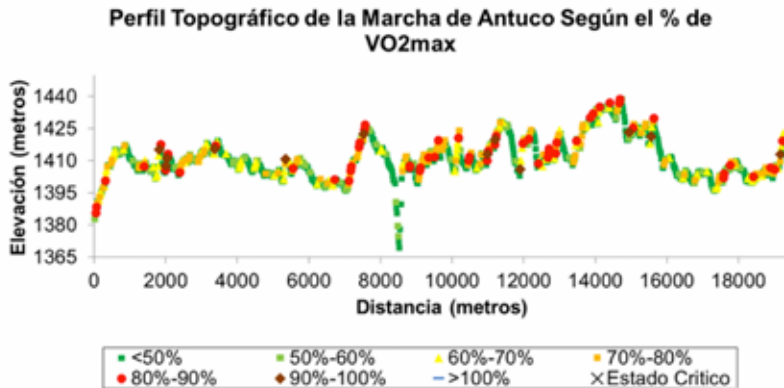


Figura N° 13: Perfil topográfico de la marcha de Antuco según el % de VO₂max.

3.5.2 Marcha de Cristo Redentor.

En el perfil del Cristo Redentor (figura N° 14) se puede observar que esta marcha tiene una inclinación constante y que las intensidades sobre el 60% son predominantes.

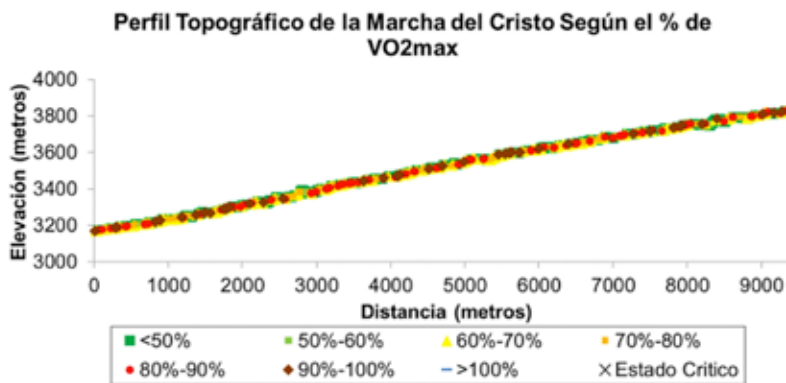


Figura N° 14: Perfil topográfico de la marcha del Cristo según el % de VO₂max.

3.5.3 Marcha de Mocoen.

Observando la figura N° 15, se puede notar que esta marcha es la mayor parte en subida, en donde los primeros 5 km se realizan a intensidades sobre el 60% del VO₂max. El resto de la ruta se realiza entre intensidades bajas y altas. Se puede notar que partes de la ruta que tienen una inclinación más pronunciada se realizan a intensidades bajo el 60% del VO₂max, es decir esas zonas se realizan a una velocidad mucho más baja que en la mayoría de la marcha, con tal de poder realizar esta en óptimas condiciones.

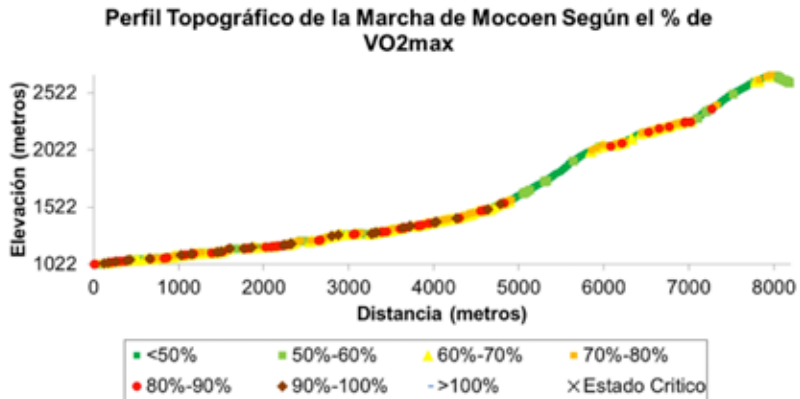


Figura N° 15: Perfil topográfico de la marcha de Mocoen según el % de VO2max.

3.5.4 Marcha de Ojos de Agua.

Se puede ver en la figura N° 16 que los primeros 4 km se realizan mayormente a intensidades de entre el 60% y 90% del VO2max, observando la variación de elevación se puede notar que esta es pequeña, por lo tanto la alta intensidad es debido a la velocidad con la que se realiza esos tramos. De los 4 km hasta los 8 km al aumentar la inclinación se disminuye notoriamente la velocidad y como consecuencia también la intensidad. Más allá de los 8 km, la ruta es en bajada y se realiza mayormente entre el 50% y 60% del VO2max.

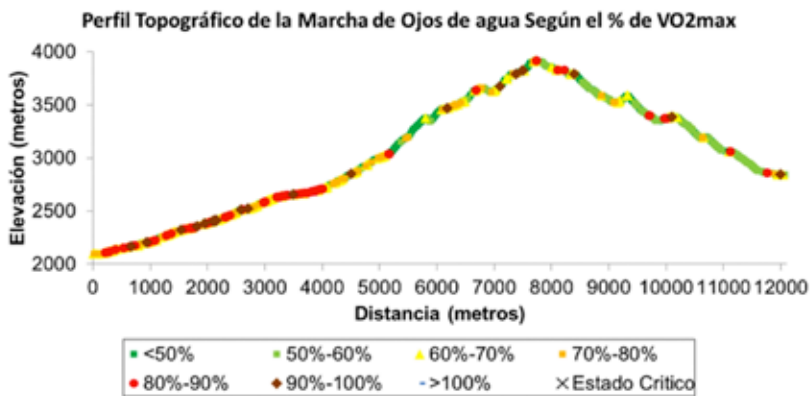


Figura N° 16: Perfil topográfico de la marcha de Ojos de Agua según el % de VO2max.

3.5.5 Marcha de Llafenco de ida.

Según la figura N°17, los primeros 3 km se realizan a intensidades altas, pero el resto de la marcha pareciera ser bastante uniforme.



Cuantificación para determinar la capacidad de marcha en montaña del combatiente individual.

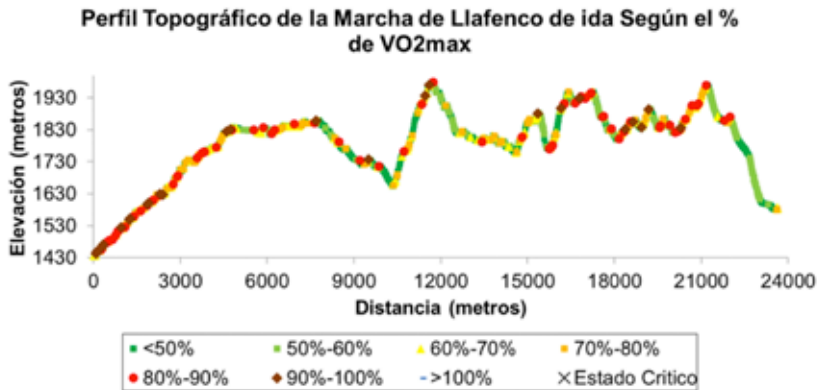


Figura N° 17: Perfil topográfico de la marcha de Llafenco de ida según el % de VO2max.

3.5.6 Marcha de Llafenco de regreso.

Si se observa la figura N° 18 esta marcha es en su mayor parte uniforme con respecto a la intensidad con la que se realiza, aunque cerca de los 15 km se puede notar intensidades elevadas y luego de los 18 km una disminución de la intensidad.

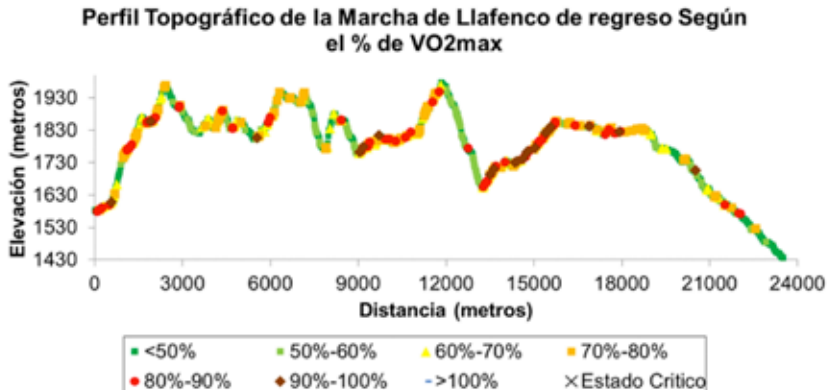


Figura N° 18: Perfil topográfico de la marcha de Llafenco de regreso según el % de VO2max.

4. CONCLUSIONES

En este artículo podemos notar que el gasto energético de las marchas varía entre los 3.400 kcal y los 5.500 kcal, lo cual es superior a las 2.878 kcal que entrega la minuta institucional de montaña, por lo tanto existe un déficit de energía de 500 kcal a 2.600 kcal aproximadamente. Según los resultados es poco probable que en la marcha del Cristo el soldado presente una disminución del rendimiento físico, a pesar de ser esta una marcha intensa, debido a que el déficit energético para esta marcha no resulta ser muy elevado.



Para la marcha de Antuco los resultados indican que es probable que ocurra una disminución del rendimiento físico, sin embargo esta marcha ocupa mayormente sus reservas de grasas para otorgar la energía necesaria, por lo que si ocurre una disminución del rendimiento, esta sería luego de un período prolongado de tiempo, lo cual no ocurre en las marchas, ya que estas se realizan a lo más por 3 días.

Para las marchas de Mocoen, Ojos de Agua, Llafenco de ida y Llafenco de regreso, el déficit de energía es muy alto, por lo que seguramente podría ocurrir una disminución del rendimiento físico, afectando con ello el cumplimiento de la misión de la Unidad.

En las marchas de Antuco y Cristo el consumo de los carbohidratos tuvieron un comportamiento dentro de los rangos recomendados. Para el resto de las marchas no se cumplieron los estándares recomendados de macronutrientes usados en este artículo.

En resumen de lo anterior, la minuta podría ser suficiente para las marchas de Antuco y Cristo, sin embargo para las marchas de Mocoen, Ojos de Agua, Llafenco de ida y Llafenco de regreso, probablemente no sería suficiente para satisfacer los requerimientos energéticos del soldado.

Otros estudios demostraron que; soldados con menor peso corporal se vieron favorecidos al transportar su propio peso en una carrera en pista atlética de potencia aeróbica (3.200 m), pero al transportar equipo de combate aquellos sujetos con mayor peso corporal se vieron menos afectados en su capacidad funcional de rendimiento aeróbico, que aquellos de menor peso corporal [18].

Se concluye que la condición física diferenciada debe ser considerada para entrenamiento de estos tipos de misión. Asimismo, las pruebas físicas de marcha con equipo serían las más idóneas para aquellas unidades de montaña en que la planificación anual de I/E considere recorridos con desniveles como los descritos en el presente trabajo.

En el presente estudio se demostró la relación calórica de la minuta institucional con la cuantificación del requerimiento energético de un soldado en 5 tipos de marchas con diferentes escenarios, de modo que un soldado es apto para el combate en la medida que pueda producir energía con diferentes duraciones y distintas modalidades. Se puede sugerir que, de los hallazgos encontrados en el presente estudio, referidos al déficit de nutrientes en la minuta institucional de montaña, sería conveniente realizar estudios de campo para validar y comprobar lo encontrado teóricamente.

Se sugiere que la medición en campo, sea para poder reproducir este estudio al resto de las unidades de la Fuerza Terrestre que instruyen y entrenan la marcha con equipo.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. Pandolf, K.B., Givoni, B. y Goldman, R.F. 4, 1977, Journal of Applied Physiology , Vol. 43, págs. 577-581.
- [2] Santee, William R., y otros. Load Carriage Model Development and Testing With Field Data. s.l. : U.S Army Research Institute of Environmental Medicine, 2003a.
- [3] Application of Energy Cost Algorithms for Load Carriage to Field Data. Santee, William R., Small, Mark G. y Blanchard, Laurie A. 2, 2003b, Journal of the Human-Environmental System, Vol. 6, págs. 69-76.
- [4] Drain, J., y otros. Load Carriage Capacity of the Dismounted Combatant- A Commander's Guide. 2012.
- [5] NATO Science and Technology Organization. Optimizing Operational Physical Fitness. 2009.
- [6] Metabolic Factors in Fatigue. Sahlin, Kent. 2, 1992, Sport Medicine, Vol. 13, págs. 99-107.
- [7] Comparative Analysis of Metabolic Cost Equations: A Review. Potter, Adam W., y otros. 3, 2013, Journal of Sport and Human Performance, Vol. 1, págs. 34-42.
- [8] External load can alter energy cost of prolonged exercise. Y., Epstein, y otros. 2, 1988, European Journal of Applied Physiology , Vol. 57, págs. 243-247.
- [9] Physiological responses to prolonged treadmill walking with external loads. J.F, Patton, y otros. 2, 1991, European Journal of Applied Physiology, Vol. 63, págs. 89-93.
- [10] Doctrina, División. Manual-Batallón de infantería de montaña. MDO 40602. Santiago : s.n., 2009.
- [11] A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals. Mifflin, Mark D., y otros. 2, 1990, The American Journal of Clinical Nutrition , Vol. 51, págs. 241-247.
- [12] Logística, División. Anexo 2. Información Nutricional Minuta Montaña. Santiago : s.n., 2015.



- [13] Committee on Military Nutrition Research, Institute of Medicine. Not Eating Enough: Overcoming Underconsumption of Military Operational Rations. Washington, D.C : National Academy Press, 1995.

- [14] Sluik, Diewertje, y otros. ANNEX J – RECOMMENDATIONS FOR NUTRIENT COMPOSITION OF COMBAT RATIONS FOR THE NATO RESPONSE FORCE. [aut. libro] The Research and Technology Organisation (RTO) of NATO. Nutrition Science and Food Standards for Military Operations. 2008.

- [15] Ejército de Chile Comando de Educación y Doctrina. Cartilla-Pruebas de Suficiencia Física. Santiago : División Doctrina, 2014.

- [16] Rayson, M. P. y Holliman, D. Physical Selection Standards for the British Army. Phase 4. Predictors of Task Performance in Trained Soldiers. 1995.

- [17] Relationship between maximum acceptable work time and physical workload. Wu, Hsin-Chieh y Wang, Mao-Jiun J. 4, 2002, Ergonomics, Vol. 45, págs. 280 - 289.

- [18] Doctrina, División. Informe de experiencia de la competencia internacional de patrullas “desierto de Atacama 2009”. 2009

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

ACCIDENTE POR DOBLE CARGA EN MORTEROS



ACCIDENTE POR DOBLE CARGA EN MORTEROS

“Este artículo fue publicado originalmente en la revista Memorial del Ejército de Chile, Vol. 495, pp. 149-165, diciembre 2015. La presente reproducción cuenta con la autorización del CESIM”.

CRL. Ramón Cápona Kurt¹
Dr. Aquiles Sepúlveda Osses²

Resumen: Este artículo aborda los accidentes que pueden acontecer en morteros cuando el disparo ocurre habiendo anormalmente dos bombas situadas en el tubo del arma, lo que se conoce como “accidentes por doble carga”. Para ello, en base a fuentes de informaciones nacionales y extranjeras, los autores exponen dos posibles mecanismos (formas) del accidente, de los cuales dependerá el daño que se produzca. Además, recopilan medidas de prevención y mitigación, destacando que la experiencia de muchos ejércitos es que el factor central corresponde al personal y su preparación. El conocimiento de este tipo de accidentes es básico para limitar su ocurrencia y efectos. Es así como las Fuerzas de Defensa de muchos países han incorporado este conocimiento al desarrollo permanente de procedimientos de operación e instrucción tendientes a proporcionar seguridad a su personal y material. Para efectos de simplificación, las descripciones de funcionamiento contenidas en este artículo se refieren a morteros de avancarga y ánima lisa, granadas de alto explosivo (HE) y espoletas mecánicas de impacto.

Palabras claves: Accidentes, Daños, Doble carga, Lesiones, Medidas de prevención y de mitigación, Morteros

Abstract: This article discusses the accidents that may occur in mortars when the shooting takes place with two bombs abnormally located in the tube, situation that is known as “double loading accidents”. For this, based on domestic and foreign sources of information, the authors consider two main mechanisms (forms) on which damage produced will depend.

-
- 1 Ingeniero Politécnico Militar en Armamento. Asesor de Ingeniería en el Departamento Sistemas de Armas del Instituto de Investigaciones y Control del Ejército.
 - 2 Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad de Chile. Doctor Ingeniero de la Universidad de París VI. Profesor de la Universidad de Chile y Academia Politécnica Militar. Asesor de Ingeniería en el Departamento Sistemas de Armas del Instituto de Investigaciones y Control del Ejército.



They also compile prevention and mitigation measures, highlighting that the experience of many armies is that the central factor corresponds to the personnel and their training. The knowledge of this type of accidents is essential to limit their occurrence and effects. This is how the defense forces of many countries have incorporated this knowledge to the development of operating and instruction procedures intended to provide security for their personnel and materiel. For simplification purposes, functional descriptions contained in this article refer to smooth-bore and muzzle-loading mortars, and impact mechanical fuses.

Key words: *Damage, Double loading, Injuries, Prevention and mitigation measures, Mortars*

1. INTRODUCCIÓN

El manejo de sistemas de armas conlleva la posibilidad inherente de variados tipos de situaciones que afectan seriamente al personal, al material y/o a la operación. En el caso de morteros, se pueden mencionar:

- Bombas que no activan integralmente su *tren explosivo rompedor*³ al impactar el blanco (“tiros sordos”).
- Bombas que no activan su *tren explosivo de propulsión*⁴ con el disparo, permaneciendo inmóviles dentro del tubo.
- Tiros que impactan a una distancia menor que la esperada (“tiros cortos”).
- Bombas que detonan su carga al interior del tubo o a muy corta distancia de él (“tiros prematuros”).
- Tiro que se desarrolla habiendo dos bombas en el tubo (“doble carga”).

Las consecuencias de estas situaciones son aún más diversas, y van desde la necesidad de aumentar la cantidad de tiros disparados para garantizar el efecto destructivo esperado en una zona de objetivos, pasando por acciones de riesgo intermedio que incluyen la necesidad de extraer una bomba sin seguro desde el interior del tubo, hasta casos devastadores con heridos y muertos entre los sirvientes del arma.

3 Conjunto de medios que permiten amplificar escalonada y sucesivamente la energía que inicia a la espoleta, hasta un nivel suficiente para garantizar la detonación de la carga explosiva rompedora (HE). Entre sus componentes más usuales están: el percutor, la cápsula iniciadora (o fulminante), el detonador (o iniciador); el multiplicador (o booster) y la carga explosiva rompedora.

4 Conjunto de medios que permiten amplificar escalonada y sucesivamente la energía del disparo que inicia la cápsula iniciadora del cartucho central, hasta un nivel suficiente para garantizar la ignición completa y simultánea de las cargas adicionales o de proyección de la granada, entre sus componentes más usuales están: cápsula iniciadora; cartucho central y cargas adicionales.

El Instituto de Investigaciones y Control del Ejército (IDIC), en su rol de asesor técnico institucional, es requerido en ocasiones por las autoridades que sustancian investigaciones sumarias, para realizar peritajes de accidentes derivados de situaciones como las antes mencionadas. En esos casos, IDIC se enfoca en el análisis técnico de las circunstancias del accidente, a fin de determinar sus causas y luego emitir informes fundados en evidencia objetiva y trazable, ver figura N° 1.



Figura N° 1: Personal de IDIC realizando, como parte de un peritaje de morteros: a) la simulación del efecto de comprimir la cabeza de una espoleta contra el culote del cartucho central de una granada y b) la determinación de las dimensiones de una munición.

Entre los trabajos periciales relacionados con morteros desarrollados por IDIC en las últimas décadas, se han presentado algunos accidentes graves con similitudes claves entre sí. Lo anterior motivó una investigación basada tanto en los antecedentes reunidos durante dichos peritajes, así como en documentos obtenidos del extranjero o accesibles en medios abiertos de la web. Las calificadas fuentes consultadas incluyen experiencias y lecciones aprendidas de diferentes cuerpos armados. Lo encontrado fue revelador y condujo a confirmar que efectivamente se estaba frente a situaciones conocidas como “accidentes por doble carga” (DC). Tal tipo de accidente se origina al haber dos bombas en el tubo del arma al momento del disparo, ver figura N° 2. Si bien es de relativa baja frecuencia, puede presentar una alta peligrosidad, ver figura N° 3.

De esta manera, el objetivo del presente artículo es, en relación con el accidente por doble carga en morteros, exponer antecedentes sobre el mismo, así como algunas de sus causas y medidas de mitigación, con la perspectiva de generar una discusión sobre el tema.

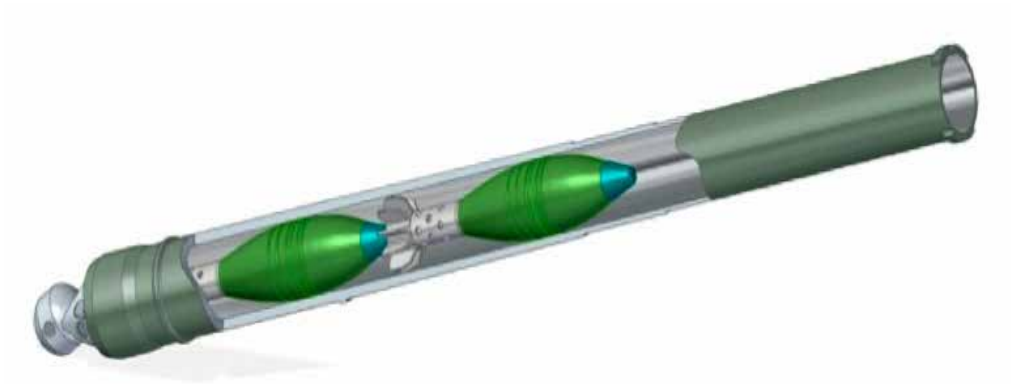


Figura N° 2: Vista esquemática de doble carga en un tubo de mortero.



Figura N° 3: Restos de mortero destruido por DC, Chile 2004.

2. EL MORTERO Y SU MUNICIÓN

El mortero es un arma de fuego de trayectoria alta y curva, en la que la fuerza de retroceso resultante de lanzar una granada pasa directamente a la placa base del arma y a través de ella, al suelo, ver figura N° 4.

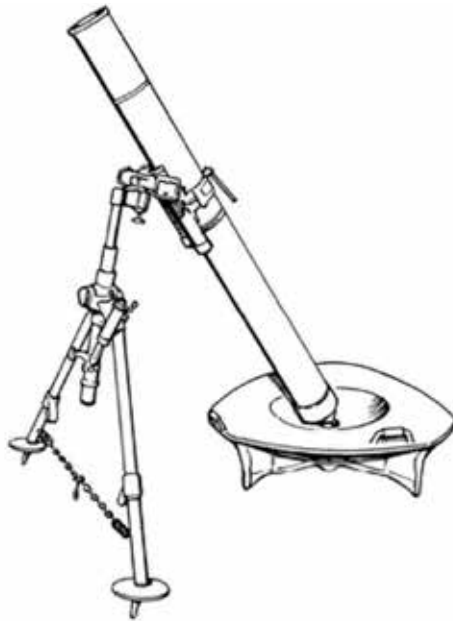


Figura N° 4: Pieza de mortero.

La figura N° 5 es un esquema donde se muestran los principales componentes de una granada de mortero. En la parte posterior de la granada se ubican el cartucho central y las cargas adicionales (o de proyección), conteniendo pólvora. La combustión de estos explosivos ocurre a una velocidad moderada, fenómeno que técnicamente se denomina **deflagración**, la que genera gases a elevada temperatura y presión, necesarios para el lanzamiento del proyectil.

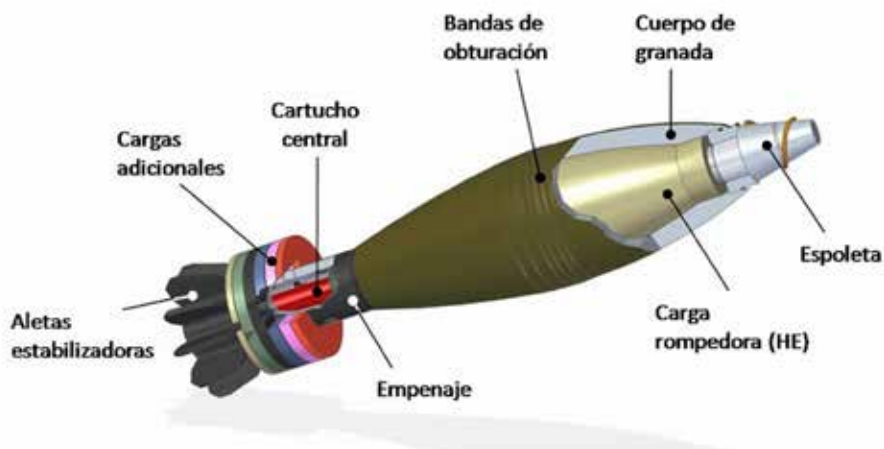


Figura N° 5: Granada de mortero y componentes.



La cápsula iniciadora o fulminante, el detonador, el multiplicador y la carga rompedora están contenidos en la espoleta y en el cuerpo de la granada. Este tren explosivo rompedor se activa por el impacto de la cabeza de la espoleta armada contra un blanco. La muy rápida combustión del explosivo rompedor se denomina técnicamente **detonación**, la que genera calor, esquirlas y una onda de choque.

La espoleta presenta un sistema de seguridad el cual en muchos casos se basa en que la cápsula iniciadora está inicialmente desalineada respecto del percutor, ver figura N° 6. De esta manera, por ejemplo, si una granada cayera accidentalmente durante su manipulación y se golpeará sobre su espoleta, aun cuando el golpe indujera directamente el movimiento del percutor, la cápsula iniciadora no se activaría al estar no alineada. El primer elemento de este sistema de seguridad es el seguro de transporte, que es habitualmente una chaveta que traba el mecanismo de armado, que permite el alineamiento del detonador. El segundo elemento está dado por un seguro de inercia, el que se activa por la elevada aceleración que alcanza la granada durante el disparo; liberado este seguro, se destraba el rotor que, al girar permite la alineación de la cápsula iniciadora con el percutor. El tiempo que toma al mecanismo la alineación de la cápsula iniciadora es equivalente a una distancia mínima recorrida por la granada desde la boca del tubo, para garantizar la seguridad de la pieza que la disparó. Ya correctamente ubicada la cápsula iniciadora respecto del percutor, la espoleta queda “armada”, esto es, en condiciones de ser activada al impactar contra un blanco.

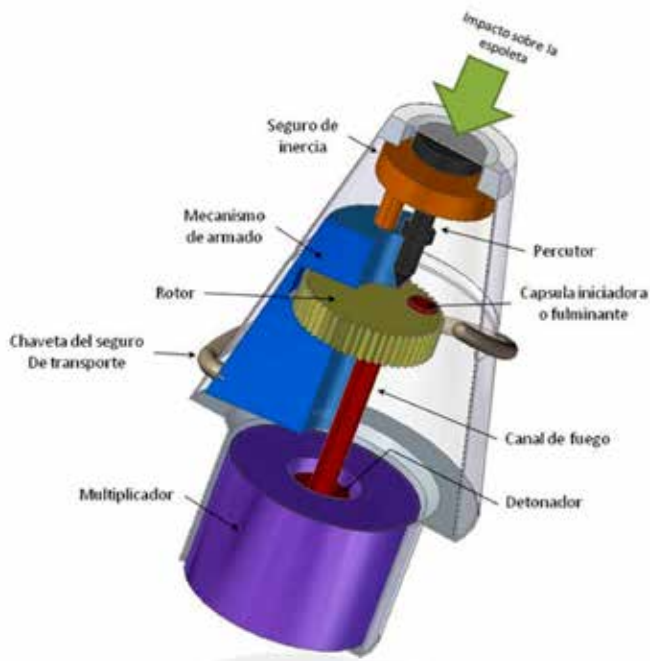


Figura N° 6: Esopoleta mecánica de impacto y componentes.



3. TIRO NORMAL

La gran mayoría de los morteros, y es el caso de todos los morteros empleados en Chile, se cargan por la boca del arma, de modo que la munición baja por gravedad, hasta llegar al fondo de éste. Como resultado, el iniciador del cartucho central de la bomba llega a enfrentar al percutor del arma, ubicado en el fondo de ella. Justamente, esta modalidad de carga, hoy prácticamente restringida a solo los morteros, es la que hace posible la doble carga.

El disparo ocurre cuando el percutor, situado en el fondo del arma, impacta al iniciador del cartucho central de la bomba, activando su tren explosivo de propulsión. Se distinguen dos formas de disparar un mortero: una de ellas corresponde al tiro automático y la otra, al tiro con disparador manual. En el tiro automático, el percutor está fijo, de manera que al bajar la bomba por el tubo, el cartucho central impacta el percutor. Por otra parte, en el tiro con disparador manual, primero se carga la bomba y luego, conforme se ordene, el sirviente correspondiente acciona el tira-fuego o tira-flector, con lo que el percutor impacta al cartucho central.

Así, por la deflagración de la pólvora del cartucho central y de las cargas adicionales, se generan gases a alta presión en el volumen comprendido entre el cierre del mortero y las bandas de obturación de la granada que se va desplazando aceleradamente. Finalmente, esta alta presión permite el lanzamiento del proyectil hacia un blanco. Dentro del tubo, la mayor presión se produce aproximadamente en el primer cuarto de éste. Para resistir esa alta presión local, el tubo presenta en esa zona paredes reforzadas con un espesor mayor. Dado que más adelante en el tubo la presión ya es más baja, la pared allí se diseña y fabrica con un espesor menor; esto permite que el arma sea más liviana, con lo que se gana en transportabilidad y maniobrabilidad.

La figura N° 7 muestra cómo evoluciona tanto la resistencia del tubo (curva negra) como la presión generada por los gases (curva azul) a medida que la bomba avanza por el tubo. Como ya se mencionó, el espesor del tubo es mayor en la parte inicial de éste que más adelante; además, la resistencia del tubo es proporcional al espesor de su pared. Por lo anterior, en dicha figura se observa que la resistencia del tubo, ver curva negra, va bajando escalonadamente al avanzar a lo largo del tubo. También la figura muestra, ver curva azul, que la máxima presión de los gases generados por la deflagración de la pólvora, se presenta aproximadamente en el primer cuarto del tubo. En un tiro normal, se tiene una condición segura cuando la curva de presión de los gases (curva azul) está siempre por debajo de la curva de resistencia del tubo (curva negra).

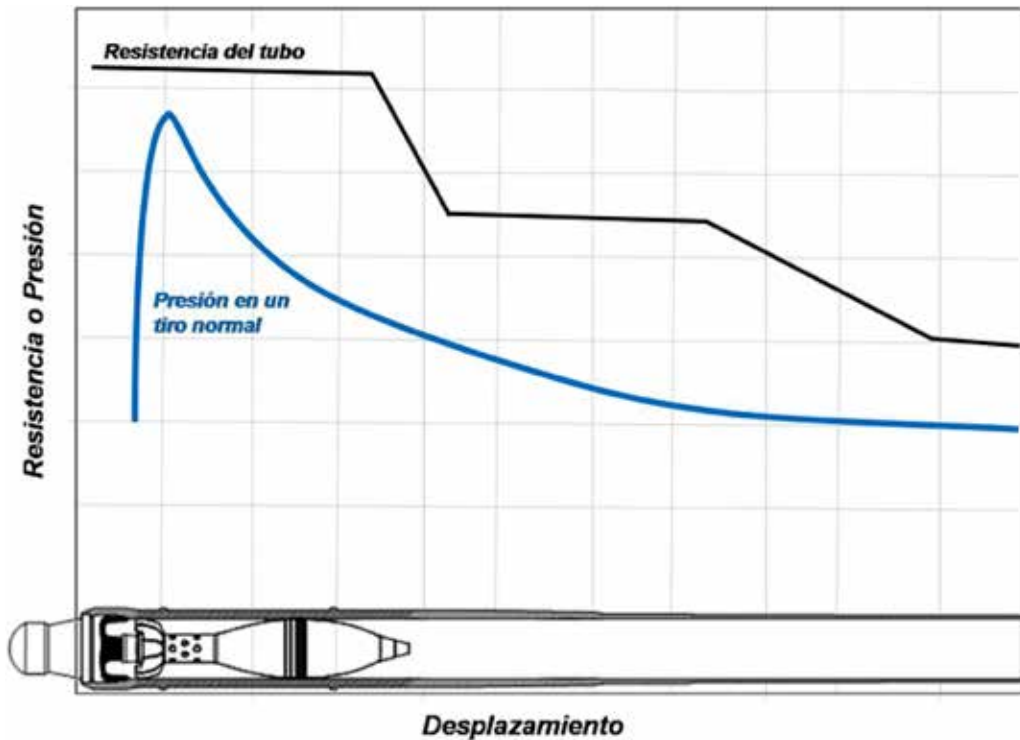


Figura N° 7: Representación esquemática de la resistencia del tubo (curva negra) y de la presión de los gases (curva azul) en función del desplazamiento de la granada a lo largo de un tubo de mortero, para el caso de un tiro normal.

4. ACCIDENTE POR DOBLE CARGA (DC)

4.1 Características generales

El accidente por DC en un mortero se origina cuando se encuentran anormalmente presentes dos bombas en el tubo del arma al momento del disparo, ver figura N° 2. Se trata de un evento que, aunque de baja frecuencia, generalmente produce graves consecuencias, pudiendo incluir la muerte de uno o más sirvientes de la pieza.

Este accidente se da tanto en tiro automático (con percutor fijo) como con disparador manual (tira-fuego), aun cuando con el disparo automático es menos probable.

En la secuencia que lleva a un accidente por DC cabe distinguir dos etapas:

- La primera se relaciona con los variados factores (dependientes del personal, material y ambiente) que pueden ocasionar o contribuir a la presencia de una primera bomba sin disparar e inadvertida en el tubo.



- La siguiente etapa se asocia a la concurrencia de dos elementos: existiendo una primera bomba inadvertida en el tubo, se carga y dispara una segunda bomba. En esta etapa son fundamentales factores estrechamente vinculados con el personal. Siempre en relación con la DC, a continuación se mencionan algunos de estos factores: falencias en conocimiento conceptual y en el reconocimiento inmediato de estar enfrentando una situación; indefinición de tareas y roles asignados a la dotación; deficiencias en procedimientos y entrenamiento; y confusión por fatiga y/o el ruido circundante.

El conocimiento de múltiples casos a los que se ha tenido acceso, ocurridos en diversos ejércitos, lleva a aseverar que nadie está libre de enfrentar un incidente o accidente relacionado con DC en morteros, y que su ocurrencia involucra críticamente factores asociados al personal.

4.2 Eventos dentro del tubo y consecuencias

Dada la complejidad de los fenómenos físico-químicos que ocurren dentro del tubo, en el caso de un accidente por DC existe una variedad de formas (mecanismos) en que ellos se pueden dar. También, a diferentes mecanismos se asocian distintos efectos o daños.

En este trabajo se presentarán esencialmente solo dos mecanismos; el primero de ellos corresponde a aquel que, según la evidencia recogida, es el más frecuente, en tanto que el segundo, aunque de baja frecuencia, presenta una severidad extrema.

4.2.1. Un primer mecanismo, el más frecuente

El primer mecanismo, que aparece como el más usual para un accidente por DC, se relaciona con la activación de a lo menos las cargas de proyección de la segunda bomba; también podrían deflagrar además las de la primera bomba. Consecuentemente, en este caso no hay un efecto relevante por parte de la carga explosiva.

Dos formas posibles de activación de las cargas de proyección de una segunda bomba, al ser cargada ésta sobre una primera ya presente en el fondo del tubo son las siguientes:

- En muchos modelos de bombas, el golpe de la cabeza de la espoleta de la primera bomba, es capaz de activar la cápsula iniciadora del cartucho central de la segunda.
- Para lo que sigue, se supondrá que la carga de proyección de la primera bomba por algún obstáculo en su bajada durante la carga no llegó a ser activada por el percutor fijo del arma. En este caso, es posible que la llegada de la segunda



bomba, desplace a la primera contra el percutor del arma y que así se activen y deflagren las cargas de proyección de esa primera bomba. En seguida, podría darse que los gases y el calor generado por tal deflagración, al pasar por el espacio entre los anillos de obturación de la primera bomba y el ánima, suban y lleguen a activar las cargas adicionales de la segunda bomba.

En concordancia con lo precisado anteriormente respecto del espesor variable del tubo, un factor determinante es el lugar donde se activa en el tubo la carga de proyección de la segunda bomba. Esta activación ahora no ocurre en el fondo del tubo, sino que más arriba, en una zona donde el disminuido espesor de pared es insuficiente para soportar la alta presión generada. En la figura N° 8 se muestra cómo en este caso la curva de presión desplazada de la segunda bomba (curva roja) supera la curva de resistencia del tubo (curva negra), provocando la destrucción del tubo, especialmente más allá de su parte inicial más gruesa. Si complementariamente se activasen las cargas de proyección de la primera bomba, la presión interior sería aún mayor y también el efecto destructivo.

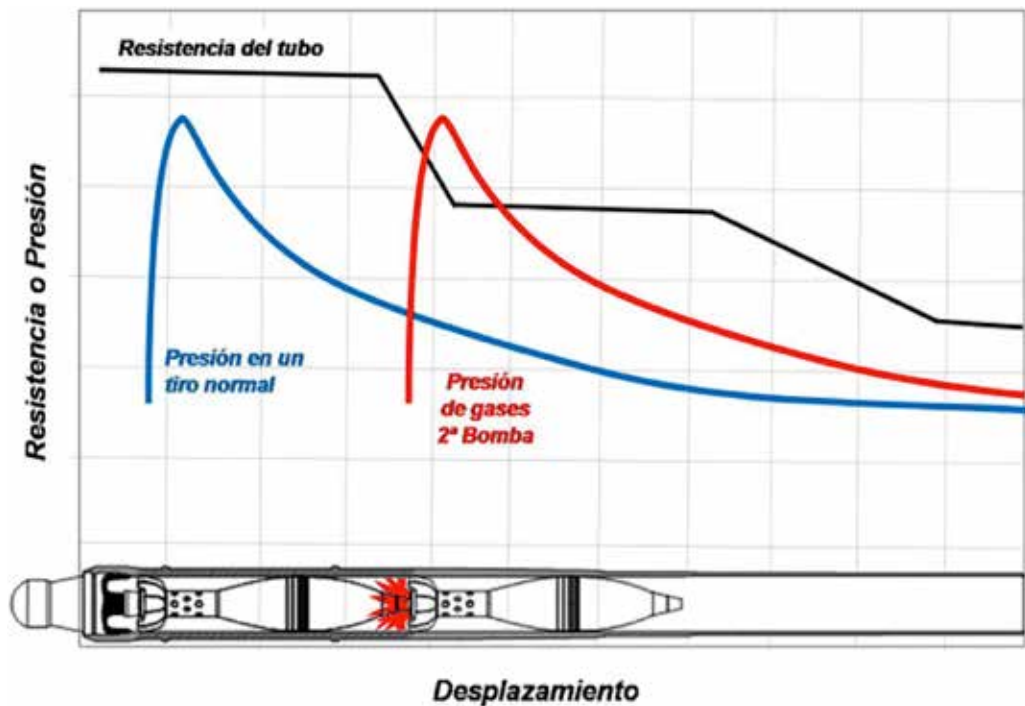


Figura N° 8: Representación esquemática de la curva de presión de los gases (curva roja) cuando ésta es generada por la carga de proyección de una segunda bomba. Se observa que esta curva está parcialmente por sobre la curva de resistencia del tubo (curva negra): la resistencia del tubo es excedida y el tubo fallará. Sólo como referencia se presenta la curva de presión (curva azul) de un tiro normal.



Esto da lugar a una forma de falla del tubo que puede considerarse como característica de este tipo de accidente por doble carga: el tubo presenta una deformación anular (englobamiento) ubicada cerca del inicio de la zona de menor espesor del tubo; además, se presentan superficies de fractura preferentemente longitudinales (ver figuras N° 3, N° 12 y N° 13), pudiendo quedar los extremos inferior y superior del tubo relativamente indemnes. También son proyectados trozos de tubo con dimensiones de hasta algunos decímetros y una onda de calor, en forma preferentemente lateral al arma. Lo anterior puede generar severas lesiones en los sirvientes próximos a la pieza accidentada y hasta algunas bajas mortales. Otra característica de este caso habitual es que no se generan mayormente esquirlas de la bomba, ni residuos que sean producto de una detonación. En ocasiones, incluso las dos bombas son lanzadas con alcances cortos y vuelos erráticos, ver figura N° 9.



Figura N° 9: Evidencia del vuelo de bombas disparadas bajo condición de DC.: a) Vuelo errático de dos bombas lanzadas horizontalmente en DC desde un tubo reforzado para pruebas (© Centro de Ensayos de Torregorda, Cádiz, España). b) y c) Granada correspondiente a tiro corto y sordo, encontrada enterrada a más de un metro de profundidad con pérdida del empenaje y parte de su espoleta, Chile, 2004.

4.2.2. Un segundo mecanismo, de extrema gravedad

En el caso relativamente infrecuente de detonación de la o las cargas explosivas, además de la destrucción del tubo y sus consecuencias, habrá una masiva proyección de esquirlas de la(s) bomba(s) acompañada de las ondas de calor y de choque correspondientes, lo que en general incrementará el número y gravedad de las bajas.



Tal sería el caso, según recientes informaciones de prensa, del accidente atribuido a una doble carga que afectó a una unidad de la Infantería de Marina de EEUU, en Nevada (Estados Unidos), en marzo del año 2013 [1-2]. La unidad se estaba ejercitando a su regreso de un período en el campo de batalla. Mientras un Marine cargaba una segunda bomba en el tubo, se produjo una explosión masiva de las bombas, con el lamentable resultado de siete fallecidos y ocho heridos. Sobre la base de los graves daños informados, la interpretación de estos autores es que se produjo la detonación de las cargas rompedoras de una o las dos bombas involucradas en la DC.

El evento se atribuyó a error humano y a otros factores: entrenamiento insuficiente con morteros 60 mm; inapropiadas órdenes de mando y procedimientos de tiro; falta de supervisión; Marines apretujados cerca de dos morteros, por las condiciones del terreno; y gran apresuramiento. A lo menos tres oficiales fueron relevados de su mando. Entre las recomendaciones apareció mayor distancia entre los sirvientes y uso de tiro automático.

4.3 Antecedentes complementarios

4.3.1 DC, incluso con tiro automático

Se reconoce que la modalidad de tiro automático es más segura que la de tiro manual (tira-fuego). Sin embargo, es un error asumir que el tiro automático es absolutamente seguro, en el sentido de considerar que con él no se podría dar una DC. A modo de ejemplo se señalan dos factores que pueden facilitar que quede una primera bomba sin ser disparada en el tubo, aun cuando se esté empleando tiro automático:

- La granada ve limitado su desplazamiento dentro del tubo durante la carga debido a la presencia de un obstáculo, como podría ser barro, residuos o incluso un “colchón” de gases en el tubo.
- El percutor del arma está desgastado o fuera de posición.

4.3.2 Dispositivos para evitar una DC

En diversos países han existido propuestas de dispositivos que impiden cargar inadvertidamente dos bombas en un mortero. Así es como se ha detectado que varios fabricantes de países del Este de Europa ofrecen este accesorio, no obstante también es posible encontrarlo en los registros de patentes en Estados Unidos. En general, se trata de un mecanismo anular que se monta en la boca del tubo, ver figura N° 10. Al ingresar la primera bomba, un componente mecánico obstruye la entrada de una segunda bomba; tal obstrucción solo se desactiva al salir la primera y única bomba.



Sin embargo, no parece que este mecanismo se haya convertido en un estándar de uso militar, particularmente en ejércitos occidentales o en operaciones de combate. Es posible que entre las causas de esta baja preferencia se cuente con que el uso del dispositivo reduciría la cadencia de tiro y afectaría la trayectoria del vuelo de la bomba.

Por otra parte, en un catálogo técnico [3] de una reputada empresa alemana fabricante de espoletas, se expresa en relación con las ventajas de los sistemas de seguridad de una de ellas: “la DM 111 A5 es segura en el caso de doble carga de un mortero”. Lo anterior en el sentido de que cualquier impacto antes del armado de la espoleta no llegará a iniciar la explosión de su detonador, ni consecuentemente a inducir la detonación de la carga explosiva rompedora de la munición.

Adicionalmente y como resultado de la aplicación del moderno concepto de munición insensible (IM) en las espoletas, está el adecuado rediseño geométrico externo de la cabeza de ellas; se trata de impedir que, en el caso de una DC, la espoleta de una primera bomba pueda facilitar la activación por impacto del cartucho central de la segunda bomba. También el reemplazo de los explosivos y pirotécnicos utilizados en el tren explosivo de la espoleta y el rediseño de sus contenedores y alojamientos permiten garantizar que, aún en la eventualidad de una indeseada explosión de la cápsula iniciadora, ésta no será transmitida al detonador. Así, las espoletas también son dispositivos que pueden ser diseñados para contribuir a limitar los riesgos cuando llega a darse una DC en morteros.

Cabe destacar que consideraciones de elementos como los expuestos revelan la preocupación respecto de un posible accidente por doble carga.



Figura N° 10: Dispositivo de seguridad instalado en la boca de un mortero para evitar la carga de una segunda bomba en el tubo.



5. UN AMPLIO HISTORIAL

Si bien el tema de accidentes militares por doble carga es en general de difusión relativamente restringida, existen variadas fuentes que revelan que ellos han afectado a numerosos cuerpos armados de manera reiterativa, constituyéndose en motivo de preocupación permanente. Se han identificado documentos de Estados Unidos, Gran Bretaña, Finlandia y Chile, donde se hace mención a este tipo de situaciones y en algunos de los cuales se recomiendan medidas para evitarlas.

Respecto de EE.UU., en un informe del Picatinny Arsenal publicado el año 1972 [4], se mencionan cinco accidentes en morteros por DC. Complementariamente en varios manuales norteamericanos de operación de morteros publicados en la década del 80 (ver por ejemplo, referencia [5]), se informa que se ha incorporado la entonces reciente advertencia: “La doble carga en morteros ha ocasionado accidente catastróficos. Cargar el arma con dos hombres trabajando alternadamente puede ser muy peligroso y podría ser fatal; también con un solo hombre la doble carga puede ocurrir. Es imperativo que exista la absoluta certeza de que una bomba previa ha dejado el tubo antes de cargar una nueva bomba”.

Además del ya referido accidente por DC ocurrido en Nevada [1-2], en la prensa apareció información de otro accidente con un mortero de 81 mm y que aconteció en Hawái el año 2006 [6]. Entonces falleció un integrante del ejército de Estados Unidos y otros tres resultaron heridos. Este caso fue llevado a los tribunales, donde una de las partes y sus peritos alegaron una DC como elemento central del accidente. El litigio judicial se resolvió el año 2014 por un acuerdo confidencial entre las partes.

Adicionalmente, en un texto británico del año 1983 para un curso de diseño de armamento, se hace una amplia referencia a la doble carga en morteros. En tal documento se afirma que, en morteros medianos y pesados, con el comandante de pieza en la posición de fuego y una dotación con tareas claramente asignadas, un accidente por DC es evitable con entrenamiento. Sin embargo, en morteros livianos, donde el uso de disparador manual es frecuente, una DC es mucho más fácil que ocurra, ya sea por una pausa entre los tiros o bien por cambio de munición. Se argumenta que en el caso de morteros muy livianos, sostenidos en los brazos, el uso del disparo manual se puede justificar en circunstancias tales como las siguientes: el impulso de la bomba sobre un percutor fijo es insuficiente para activar su tren de propulsión debido al bajo ángulo del tubo y/o al poco peso de la bomba; el encargado del mortero debe cambiar de posición, por razones de seguridad; hay que tener una bomba lista, de iluminación, por ejemplo, para responder a una alerta que podría ser urgente; etc. Se menciona una situación en que se cargó una bomba HE sobre una bomba de humo; al disparar, las dos bombas salieron con un alcance corto, sin dañar el tubo. Se destaca que cuando el mortero es disparado sobre algún tipo de carro, deben maximizarse las precauciones en relación con una doble carga.



La información más completa sobre este tipo de casos corresponde a un detallado informe finlandés [7]. El documento analiza un accidente con un mortero de 120 mm, ver figura N° 12, que tuvo lugar en el campo de tiro de Rovajärvi, Finlandia, en diciembre del año 2005, con un fallecido y cinco heridos del ejército de ese país. Los peritajes realizados, los cuales incluyeron pruebas de tiro controladas y destructivas de morteros, mostraron que se trataba de un accidente por DC. Ello quedó irrefutablemente confirmado por una filmación del suceso recuperada después de concluidos los peritajes. Los daños causados por el accidente se atribuyeron principalmente a la deflagración de las cargas de proyección.

La investigación finlandesa estableció la ocurrencia de los siguientes eventos en el interior del tubo durante el disparo: La acción del tira-fuego produjo la ignición de las cargas de proyección de la primera bomba y el correspondiente desplazamiento de ella. Así, la espoleta de la granada inferior golpeó contra el cartucho central de la granada superior, deformándose e iniciando la combustión de las cargas de proyección de la granada superior. El vaso de la granada inferior se deformó y fracturó, permitiendo la quema parcial del explosivo rompedor, sin que éste detonara; lo anterior contribuyó a aumentar aún más la ya excesiva presión sobre las paredes del tubo. Finalmente, el tubo se destruyó, alcanzando a ser expulsadas las bombas.

Complementariamente, se destaca el hecho de que el uso de chalecos anti-fragmentos durante el ejercicio contribuyó a evitar de manera importante un número mayor de bajas, ver figura N° 11.

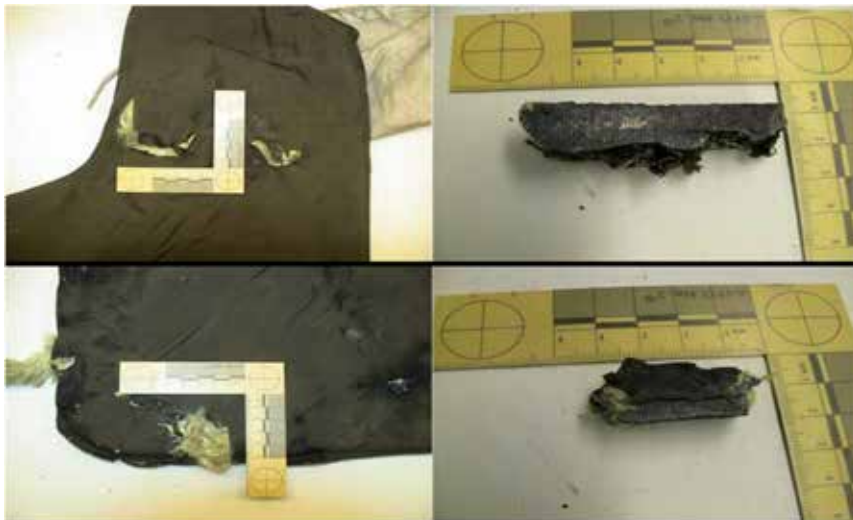


Figura N° 11: Dos de los fragmentos más grandes de granada, encontrados en el chaleco protector del sirviente-cargador. Ambos fragmentos perforaron cuatro capas, de un total de catorce que componían el chaleco. Accidente por Doble Carga en mortero 120 mm en Rovajärvi, Finlandia, Dic.2005 (Photo: © Safety Investigation Authority Finland). [7]



El citado informe [7] incluye además un recuento de accidentes de este tipo registrados en países de Europa del Norte, así como recomendaciones para evitar su reiteración. También se hace referencia a la existencia, desde el año 2001, de un registro referido a situaciones de cuasi-accidentes en las Fuerzas de Defensa de Finlandia.

Es notable que al pie de la portada de este informe elaborado por el Centro de Investigación de Accidentes, se expresa: “El presente informe de investigación tiene como propósito mejorar la seguridad y prevenir futuros accidente. No trata de determinar responsabilidades, culpa ni pago de indemnizaciones. El uso de este informe de investigación no es para fines distintos que la mejora de la seguridad.”



Figura N° 12: Tubo de mortero 120 mm objeto de accidente por DC en Rovajärvi, Finlandia, Dic.2005 (Photo: © Safety Investigation Authority Finland). [7]

La ya presentada figura N° 9.a, corresponde a una filmación realizada por el Centro de Ensayos de Torregorda (CET), Cádiz, España, una instalación técnica militar dependiente del Ministerio de Defensa. Se trata de un estudio del comportamiento de granadas de morteros disparadas bajo condiciones de DC, en una clara manifestación del interés y preocupación por estas situaciones.

En el ámbito institucional, IDIC participó en tres peritajes sobre accidentes relacionados con explosiones prematuras en morteros de 120 mm. Dos de estas situaciones ocurrieron en los últimos diez años, con resultados lamentables para el personal. En todos los casos, los tubos se destruyeron presentando daños generales similares entre sí, ver figura N° 13, y además similares a los del tubo objeto de doble carga presentado en el informe finlandés, ver figura N° 12. Como además en los tres casos nacionales no se detectó evidencia de detonación del alto explosivo ni proyección de esquirlas, se desprende que ellos, como el caso de Finlandia, correspondieron a doble carga con solo deflagración de cargas de proyección dentro del tubo, que es el mecanismo más usual de este tipo de accidentes (ver capítulo 4.2.1).



Figura N° 13: Daños presentados por los tubos de tres morteros 120 mm peritados por IDIC. Los tubos presentan daños generales similares entre sí y también con aquellos del tubo del accidente de Finlandia del año 2005 (ver Figura 12). Estos daños son consistentes con accidentes por doble carga con solo deflagración de cargas de proyección.



6. CAUSAS Y MITIGACIÓN

Para evitar un accidente por doble carga, lo básico es saber y aceptar que es posible que éste ocurra, y que sus consecuencias son muy graves. Complementariamente, es necesario definir y adoptar las mayores precauciones posibles para que: a) Este accidente no ocurra y b) si él ocurriera, atenuar sus consecuencias.

De esta manera, a continuación se exponen algunas causas posibles y medidas de mitigación de un accidente por doble carga.

6.1 Causas posibles de un accidente por DC

- Escaso conocimiento de este tipo de accidente, de sus síntomas, causas y consecuencias.
- Falta de procedimientos y/o entrenamiento para disminuir el riesgo. En particular, insuficiente asignación de responsabilidades individuales y colectivas.
- Incorporación improvisada al tiro de personal no debidamente capacitado.
- Daño o funcionamiento inadecuado del percutor del arma.
- Obstáculos que dificulten la bajada de la bomba por el tubo.
- Existencia de factores que contribuyan a que los sirvientes se confundan: fatiga del personal, presión por la responsabilidad de cumplir lo programado; voces de órdenes y ruidos de tiros provenientes de piezas demasiado cercanas; alta cadencia de tiro; etc.
- Falta de control sensorial directo por parte de los encargados de verificar la salida de los tiros. Además del medio visual directo (los responsables no deben agachar la cabeza) y auditivo, está el control del “remezón” de las patas del trípode por parte de sirvientes que las sujetan.
- Dificultad para la rápida y efectiva verificación de la presencia de una primera bomba dudosa ya posiblemente ubicada en el tubo.
- Insuficientes medidas de prevención de riesgos para situaciones de tiempos de paz, donde estos accidentes son menos aceptables.
- Carácter no progresivo de la instrucción y falta de coordinación entre las exigencias de los ejercicios y el nivel de conocimiento real de cada sirviente.
- Pérdida de la cuenta, por el sirviente responsable, de la cantidad de bombas efectivamente disparadas.
- Insuficiente suministro y uso de municiones de ejercicio.

6.2 Medidas de mitigación de efectos de un accidente por DC

- Incorporación del área de los costados del tubo a la zona de seguridad del mortero.
- Limitación al mínimo de la cantidad de sirvientes próximos al arma en el momento del tiro.



- Mantenimiento de suficiente distancia de seguridad entre las piezas.
- Uso de parapetos o trincheras de protección para los sirvientes que no deban estar próximos al arma en el momento del tiro.
- Uso obligatorio de cascos y chalecos anti-fragmentos estandarizados.
- Servicios efectivos de comunicación, asistencia y evacuación médica.
- Implementación de un sistema de registro y análisis de accidentes y cuasi-accidentes orientado a garantizar la retroalimentación de la información para minimizar la reiteración de ellos.

7. CONCLUSIONES

De la presente investigación acerca de accidentes por doble carga en morteros, realizada por personal del IDIC sobre la base de información de fuentes nacionales y extranjeras, se desprenden las siguientes conclusiones principales:

- a. La doble carga genera un tipo de accidente que, aunque de baja frecuencia, generalmente tiene graves consecuencias para el personal y el material.
- b. La doble carga ha afectado y sigue afectando a prestigiosas organizaciones militares, por lo que es motivo de permanente preocupación.
- c. La doble carga es por su naturaleza producto de un error humano, pudiendo haber factores ambientales, condiciones del servicio y del material que contribuyan a que ella suceda.
- d. El conocimiento de este tipo de accidentes en términos de sus causas, mecanismos y medidas de prevención y de mitigación, es básico para limitar su ocurrencia y efectos. Es así como ejércitos de muchos países han incorporado este conocimiento al desarrollo permanente de procedimientos de operación e instrucción tendientes a proporcionar seguridad a su personal y material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Onnettomuustutkintakeskus (Accident Investigation Board, Safety Investigation Authority, Finland) por la concesión de permiso para la utilización de parte del material gráfico del informe de accidente B3/2005Y (ISBN 951-836-194-0). En el presente artículo además se han incorporado conceptos contenidos en tal informe.

REFERENCIAS

- [1] Investigation: Mortar explosion that killed 7 Marines result of double-loaded round, Marine Corps Times. Jan. 21, 2014, Hope HodgeSeck. Página electrónica consultada en julio 2014:



<http://www.marinecorpstimes.com/article/20140121/NEWS/301210019/Investigation-Mortar-explosion-killed-7-Marines-result-double-loaded-round>

- [2] Human error caused Nevada depot blast that killed seven Marines: probe, E.M. Hohnson and J. Kaminsky, January 23, 2014, Chicago Tribune (Reuters). Página electrónica consultada en julio 2014: http://articles.chicagotribune.com/2014-01-23/news/sns-rt-us-usa-nevada-explosion-20140123_1_hawthorne-army-depot-seven-marines-human-error
- [3] Mortar Fuze PD DM 111 A5, Junghans Feinwerktechnik, Germany. (Catálogo técnico no fechado; Circa 2005).
- [4] Technical report 4321, Picatinny Arsenal, New Jersey, USA, February 1972.
- [5] TM 9 – 1015 – 215 – 10, Operator’s Manual for 4.2 – inch Mortar, M30 (1015 – 00 – 840 – 1840), Headquarters, Department of the Army, 16 september, 1988.
- [6] Verdicts & Settlements February 12, 2014: Settlement Ends Suit Over Exploded Mortar Shell, VLEX United States. Página electrónica consultada en Julio 2014:
http://law-journals-books.vlex.com/vid/settlement-over-exploded-mortar-shell-492901178?utm_expid=6072114-15.wkYviiCHQw-2rOIOMla-dQ.0 .
- [7] Accidente de Mortero en el área de disparo de Rovajärvi, ocurrido el 2.12.2005, Informe de Investigación B3/2005Y, Onnettomuustutkintakeskus (Accident Investigation Board, Finland), Helsinki, 2007. (Traducción no oficial al castellano desde el finlandés, idioma original). Página electrónica consultada en julio 2012:
<http://www.turvallisuustutkinta.fi/en/index/tutkintaselostukset/muutonnettomuudet/tutkintaselostuksetvuositain/muutonnettomuudet2005/b32005ykranaatinheitinonnettomuusrovajarvenampuma-alueella2.12.2005.html>.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**INTEGRACIÓN DE UN RADAR DE VIGILANCIA EN LA
PLATAFORMA VEHICULAR DE UN PELOTÓN DE
EXPLORACIÓN TERRESTRE (PET)**



INTEGRACIÓN DE UN RADAR DE VIGILANCIA EN LA PLATAFORMA VEHICULAR DE UN PELOTÓN DE EXPLORACIÓN TERRESTRE (PET)

CRL. Jorge Kunstmann Casas.¹

MAY. Álvaro Jofré Elorza.²

MAY. Francisco Villalobos Sepúlveda.³

Resumen: *El siguiente estudio plantea la factibilidad de integrar un sistema de vigilancia (radar) sobre una plataforma vehicular (jeep) como lo muestra la figura N° 1. Esta integración será analizada desde la perspectiva de dotar a una unidad de exploración terrestre de un sistema de alerta y vigilancia para incrementar la capacidad de la unidad en el cumplimiento de su misión. Se desarrollará un análisis de la plataforma, sus capacidades y restricciones para incorporar el nuevo componente sin degradar su movilidad y autonomía, además de elevar la seguridad y protección de la tripulación. Los cálculos desarrollados demuestran la factibilidad de dicha integración, teniendo presente las consideraciones y modificaciones necesarias de realizar para obtener una nueva capacidad para este tipo de unidades de exploración.*

Palabras claves: *Compatibilidad electromagnética, Ergonomía, Integración, Interface, Presupuesto de energía, Relación peso-potencia*

Abstract: *The study, conducted as part of curricular activities magister Weapon System and Military Vehicles, provides for the implementation of the various disciplines of postgraduate studies. The need to integrate a surveillance system (radar) on a vehicle platform (jeep). This integration will be analyzed from the perspective of providing a unit of land exploration of a warning and monitoring system to increase the capacity of the unit in fulfilling its mission. An analysis of the platform, capabilities and constraints to incorporate the new component without degrading its mobility and autonomy, as well as increasing the safety and security*

1 Ingeniero Politécnico Militar en Armamento.

2 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Mecánica.

3 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Mecánica.



of the crew will be developed. The calculations show the feasibility of developing such integration, bearing in mind the considerations and modifications necessary to perform for a new capacity for this type of exploration scanning units.

Key words: *Electromagnetic, compatibility, Ergonomics, Integration, Interface, Power budget, Power-weight ratio*

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del trabajo es aplicar los conceptos y las diferentes herramientas de mecánica computacional, ergonomía, compatibilidad electromagnética, en la resolución de un problema práctico, considerando el diseño de una solución a nivel sistema, para analizar la viabilidad de integrar un radar de vigilancia «GO 12» sobre un «jeep Land Rover Defender 130», con el propósito de incrementar la capacidad técnica de este tipo de unidades de exploración y generar con ello una capacidad militar emergente.

El desarrollo de un diseño preliminar de integración de un sistema, concebido inicialmente como portátil, sobre una plataforma vehicular, para entregar una solución técnica de integración fundamentada en el análisis de la misión, performance y rendimiento esperado para el PET,⁴ fundamentado mediante cálculos y estudios que respalden las decisiones adoptadas en los aspectos de la integración.



Figura N° 1: Integración de un radar a una plataforma vehicular.

Fuente: <https://www.bnsd.co.uk>

4 Pelotón de exploración terrestre.



2. METODOLOGÍA PARA LA INTEGRACIÓN

La metodología de integración de sistemas aplicada implica realizar las siguientes consideraciones para evitar degradar las prestaciones del vehículo y el radar, generando sinergia en el empleo combinado como un sistema «Radar-Vehículo». Las restricciones a considerar fueron las siguientes:

- Evitar o minimizar la degradación de la plataforma vehicular y del radar, producto de la integración del radar.
- Satisfacer la funcionalidad del vehículo del PET, respecto a lo declarado en la doctrina institucional del empleo de los medios técnicos en la materialización de las misiones de observación, vigilancia y la búsqueda de información de combate.
- Permitir que el radar, una vez integrado, sea autónomo para el cumplimiento de una misión estándar, considerando principalmente la demanda de energía necesaria para el funcionamiento de los componentes del sistema.
- Incrementar el nivel de protección para la tripulación como prioridad y secundariamente para el equipamiento, considerando las implicancias en cuanto al aumento de peso, autonomía asociada, forma de empleo de los medios y el armamento de la tripulación.

Todo lo anterior para dar satisfacción al cumplimiento de una misión de exploración estándar definida en 72 horas continuas de funcionamiento de todos los componentes de comunicaciones, radar, además de conservar la autonomía del vehículo.

2.1 Pelotón de exploración terrestre

Los pelotones de exploración terrestre tienen una estructura especialmente concebida para cumplir misiones de exploración en el campo de batalla de acuerdo con las características de la unidad a la que pertenece y de la zona donde operará. Podrán variar su organización para el combate, y afrontar las diversas situaciones particulares que se puedan presentar, en función de la misión específica.

Los pelotones de exploración terrestre de nivel División y Brigada, cuentan con una serie de medios de exploración técnica y equipos para apoyar el cumplimiento de su misión de exploración y/o seguridad, tanto de día como de noche, en el área de empleo de la unidad, con el objeto de incrementar las capacidades de obtención de información sobre el adversario, el terreno, y apoyar la conducción de las operaciones de la unidad.



Las misiones generales del PET, pueden ser flexibles y adaptarse de acuerdo con los factores METTTC⁵ y las características de la unidad.

Las unidades de exploración deben cumplir numerosas tareas durante una misión, entre las cuales están:

- Encontrar, identificar y reportar todas las fuerzas adversarias dentro de la zona.
- Explorar terrenos específicos dentro de la zona y terrenos críticos que se identifiquen durante la ejecución.
- Reportar, oportunamente, la información que se obtenga, lo más cercano al tiempo real.

La doctrina actual no define la forma de empleo de los elementos técnicos y de las plataformas vehiculares de un PET, lo cual, desde el punto de vista de un estudio de integración no representa una limitación. Los requerimientos operacionales darán la orientación para que los requerimientos técnicos del estudio de integración permitan incorporar una nueva capacidad a la plataforma vehicular de esta unidad.

2.2 Sistemas intervenidos

2.2.1 Plataforma vehicular Land Rover Defender 130

Vehículo liviano, que permite transportar a tres exploradores más un conductor, todos con su equipo de combate, armamento individual, armamento colectivo y munición. En la actualidad cuenta con soportes interiores para alojar equipos y armamento, parrillas externas porta equipaje, afustes de armamento colectivo y alojamientos para lanzacohetes.



Figura N° 2: Land Rover modelo Defender 130.

5 Misión-Enemigo-Terreno-Tiempo atmosférico-Tropas disponibles-Consideraciones civiles.



El modelo Defender 130 (figura N° 2), con capacidad para el empleo en zonas desértica costera, depresión intermedia con arena, chusca y piedra, sin limitaciones de tránsito en cuanto a condiciones de terreno (arenal, terreno no compactado, terreno barroso), con bloqueo de diferencial, puede tractar un vehículo del mismo tipo, por al menos 50 km, de fácil y rápida reposición en terreno, neumáticos todo terreno con un ancho mínimo de 225 mm, con diseño tubular, con capacidad para rodar a baja presión en terrenos blandos, diámetro y ancho del neumático, sin contacto con la carrocería y con diseño que minimiza la generación de huellas y polvo. Tiene un peso bruto de 3.050 kg y su carga útil máxima es de 1.165 kg.

Tiene una estructura robusta que permite el carguío y transporte del personal con su equipo de combate completo, armamento y munición (3.050 kg). Posee un huinche de tracción eléctrica mayor o igual a 1.500 kg instalado en la parte delantera del vehículo, pintura anti corrosión, defensas frontal y trasera tubulares.

2.2.1.1 Sistemas del vehículo

Cuenta con un motor diésel de cuatro tiempos 2.400 cc, con potencia nominal de 122 hp, torque 350 Nm a 2000 rpm, inyección electrónica multipunto, desempeño en altura, hasta los 5.000 msnm, desarrolla una autonomía de 600 km. Cuenta con una planta motriz con alternador de 12 volts y 150 Amp/hora, temperatura de operación entre -10 y +50 °C y un sistema de transmisión, caja de cambios mecánica.

El sistema de suspensión delantera independiente rígida, permite disminuir los efectos de las vibraciones en la tripulación conforme a ISO Vibración estándar 2631. La suspensión trasera tipo “Heavy Duty” permite llevar toda la carga necesaria sin variar el comportamiento del vehículo, además de contar con una vida útil extendida. El sistema de dirección del vehículo es hidráulica asistida.

En cuanto al sistema eléctrico, este está constituido por un banco de baterías con una capacidad de 1.440 Wh y autonomía energética de entre una y tres horas. Cuenta con enchufe para carga eléctrica de 12 y 24 volts que permite la alimentación de equipos de telecomunicaciones y computadores. Un enchufe eléctrico hembra de 7 polos para remolque en la parte exterior trasera y una capacidad para instalar controles de luces tácticas en la cabina principal, luces traseras de vehículo independiente y luces infrarrojas.

Finalmente, el sistema de frenos hidráulicos de doble circuito, discos delanteros y traseros, permite detener completamente el vehículo en máxima pendiente (vertical y lateral), con máxima carga.



2.2.2 Radar GO-12, de vigilancia terrestre ligero

El Ground Observer 12 (GO-12, figura N° 3) es un radar de vigilancia terrestre especialmente diseñado y configurado para los requerimientos de la infantería y las fuerzas especiales, tropas que requieren de total portabilidad (peso ligero y pequeño tamaño), de elevada cobertura para propósitos de exploración, proporciona facilidad de integración con otras redes y sistemas.

Puede utilizarse de modo autónomo sobre un trípode o *integrado en plataformas vehiculares*. La configuración para transporte con trípode y MMI⁶ portátil pueden realizarse en tiempos menores a 2 min y por una sola persona.

Dado su pequeño tamaño (Sensor 0,53m x 0,35m x 0,13m) y peso ligero,(16 kg) un pack de radar autónomo incluyendo MMI portátil, trípode, cables y juego de baterías (para funcionamiento de 6 h) puede llevarse fácilmente mediante un arnés de transporte a lo largo de grandes distancias.

Gracias a su interfaz Ethernet/ASTERIX estándar, el sensor GO-12 puede integrarse fácilmente en sistemas y manejarse mediante principio cliente-servidor a través de cualquier red IP (cable, LAN de fibra óptica, WiFi, etc.) desde cualquier PC estándar.

Dispone de built-in-test (BIT) con cobertura en profundidad (durante funcionamiento y offline) lo que permite la lectura remota. Puede recibir alimentación desde fuentes de energía estándar de 24V (baterías, generadores, alternadores de vehículos) o a través de un convertidor CA/CC desde la red local.

Para la configuración autónoma, dispone de una fuente de alimentación por batería que permite el cableado simple a una distancia de hasta 100 m.

El GO-12, diseñado bajo las normas MIL-STD-810F y MIL-STD-461E, permite operar en cualquier entorno físico y electromagnético, desde -32 °C a +65 °C y con ráfagas de viento de hasta 130 km/h. El radar es 100 % estanco al agua (1m de inmersión) y resistente a la arena y el polvo. El concepto de mantenimiento multinivel del GO-12 permite una sencilla adaptación a las necesidades de las organizaciones, mientras que los MTTR⁷ bajos (≤ 5 min para cambio de LRU⁸ a nivel de operario, ≤ 30 min para cambio de SRU⁹ a nivel de campo) permiten una reparación rápida.

6 Man Machine Interface.

7 Mean Time To Repair.

8 Line Replaceable Unit.

9 Shop Replaceable Unit.



Figura N° 3: Radar GO 12

Fuente: <https://www.thalesgroup.com/en/ground-observer-12-go-12>

2.2.2.1 Características

- Modos múltiples
- Adquisición manual
- Búsqueda (vigilancia)
- Single Target Tracking (STT) o seguimiento de objetivo único
- Registro de fuego (opcional)
- Sectores múltiples (hasta 5) cada uno de hasta 360°
- Ajuste individual de parámetros
- Track-While-Scan (TWS) para 40 objetivos
- Clasificación automática de objetivos (o salida de tono Doppler)
- Función de grabación/reproducción

2.2.2.2 Parámetros claves

- Cobertura (hasta 27 km)
- Franja de alcance de 12 km (aumento de 24 km)
- Alcance mínimo de 70 m
- Haz de elevación $\approx 4^\circ$ ($\pm 15^\circ$ de posicionamiento)
- Velocidad radial de 1,5 km/h a 400 km/h
- Velocidades de escaneo: 12°/s a 32°/s
- Rangos de detección (PD=90%, Pfa=10⁻⁶)
- Persona (0.5 m²): ≥ 6 km
- Vehículo ligero (2 m²) ≥ 8 km
- Vehículo (10 m²) ≥ 12 km
- Helicóptero (5 m²) ≥ 11 km
- Peso (sensor aprox. 12 kg): aprox. 25 kg para pack completamente autónomo incluyendo trípode, MMI, baterías (6 h de funcionamiento), cables y arnés de transporte.



3. DESARROLLO DE LA INTEGRACIÓN

Dentro del análisis de la integración, se han tomado en cuenta los aspectos dimensionales, de performance del vehículo y del radar, sobre la base de la información presentada. Al respecto, el principal elemento de análisis de la funcionalidad del vehículo, tiene relación con el peso y cuáles son las consecuencias directas o indirectas en las performances y prestaciones del sistema con la integración del componente y equipamiento del radar.

3.1 Diseño de interfaces de integración

Para desarrollar la integración se realizó un estudio de las alternativas de soportes existentes en el mercado y que actualmente se encuentran en uso en diversos ejércitos. La idea de solución consiste en reemplazar la escalera adosada al parachoques trasero del vehículo (parte de chasis del Land Rover) y unida en su parte superior a la jaula multipropósito, por un sistema de mástil neumático que permita el izaje del sensor del radar y además facilitar a la tripulación, acceder a la jaula superior mediante soportes destinados como pisaderas.

El software de modelación empleado para diseñar la interface mecánica fue el SOLIDWORKS, el que permite modelar los componentes del diseño.

3.1.1 Mástil (figura N° 4)

El mástil que soportará el sensor del radar y que permitirá su izaje, está compuesto de 4 secciones (tabla N° 1), cada una de ellas con las siguientes dimensiones:

Tabla N° 1: Dimensiones del mástil.

SECCIÓN	DIÁMETRO mm	ALTURA mm	ALTURA ÚTIL mm
1	100	2.200	2.000
2	120	2.100	1.900
3	140	2.000	1.800
4	160	1.900	1.900

Como cada sección va al interior de la otra (1 dentro de 2 y sucesivamente, sin considerar la 4ta. sección), se considera un traslape de 0,2 m entre sección y sección, por lo que el mástil desplegado posee una altura útil de 7,6 m, lo que sumado a la



distancia que existe desde el parachoques trasero al suelo (lugar donde será instalado mediante un soporte, 0,4 m), alcanzará una altura de 8 m. Esta altura no considera las dimensiones del sensor del radar (0,5 m).

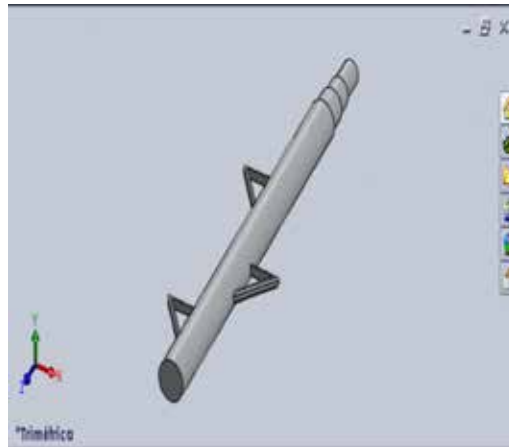


Figura N° 4: Modelo del mástil.

El material seleccionado para construir todos los componentes fue la aleación de aluminio 3.0204 (EN AW-1200), cuyas propiedades físicas son presentadas en la tabla N° 2 y que corresponde a la biblioteca del software utilizado para el diseño:

Tabla N° 2: Características del material seleccionado.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Módulo elástico	7e+010	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0,3897	N/D
Módulo cortante	2,7e+010	N/m ²
Densidad de masa	2700	kg/m ³
Límite de tracción	350000000	N/m ²
Límite elástico	200000000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	2,4e-005	°K
Conductividad térmica	204	W/(m-°K)

Por el material seleccionado el mástil pesará 88 kg. Como el mástil reemplazará a la escalera que tiene el vehículo, este fue diseñado de tal forma que se le incorporó a la 4ta sección de su estructura 3 soportes o pisaderas que permitirán a la tripulación,



tener acceso a la parte superior de la plataforma las que además deben permitir el libre acceso, apertura de la puerta trasera y que los soportes exteriores no sobrepasen las dimensiones del vehículo. El reemplazar la escalera por el mástil incrementa el peso del vehículo en 48 kg ya que la escalera extraída pesa por si sola 40 kg.

3.1.2 Interfaz de soporte mástil-chasis

El soporte del mástil (figura N° 5) debe soportar el peso del mástil y el sensor del radar, debiendo ser conectado directamente al chasis del vehículo, permitiendo una mayor resistencia ya que además de soportar el peso propio de los componentes, deberá permitir que la tripulación acceda a la jaula superior.

El soporte deberá además soportar todas las solicitaciones durante la operación del radar, principalmente los momentos flectores producto de las cargas de viento presentes en la zona de empleo (esfuerzo principal).

En cuanto a su diseño, esta base permite introducir las secciones del mástil, posee un orificio en la parte inferior donde se conectará el suministro de aire proveniente del acumulador para el izaje del mástil. El soporte estará conectado directamente al chasis asegurando de esta forma un mayor grado de rigidez.

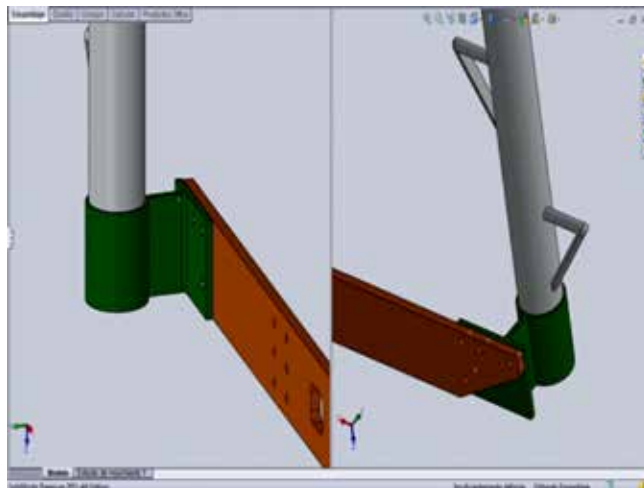


Figura N° 5: Modelo de unión soporte del mástil con el chasis.

El mástil será ubicado en la misma posición en que se encontraban los soportes inferiores de la escalera, permitiendo el libre acceso a la parte posterior del vehículo. Su posición no interferirá con la salida de los gases del tubo de escape y las luces de freno del vehículo.



Figura N° 6: Parte posterior Land Rover Defender (escalera a reemplazar).

3.1.3 Interfaz de soporte mástil-jaula

Como el mástil en sí, será empleado como una escalera (figura N° 7), se diseñó una segunda interfaz que junto con dar mayor rigidez al soporte del sensor del radar, permitirá tolerar los esfuerzos cuando el vehículo se encuentre en movimiento, cuando la tripulación acceda a la parte superior de la plataforma y colaborará con la interface mástil-chasis para mantener la posición de operación del radar a la altura requerida (8 m máximo) soportando las cargas principalmente producto del viento.

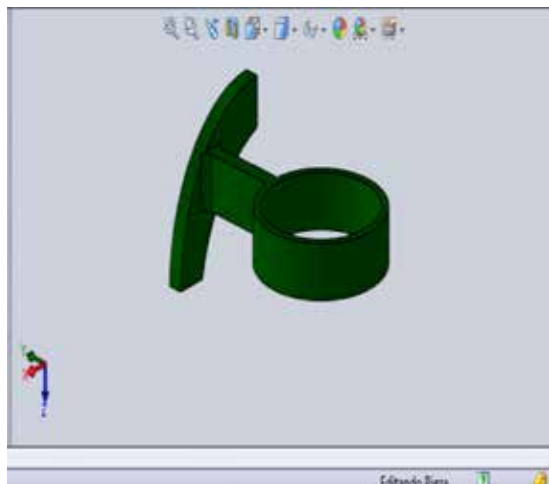


Figura N° 7: Modelo de la interface mástil-jaula.



3.1.4 Interfaz de soporte mástil-sensor

Se empleará el mismo sistema que se utiliza para integrarlo al trípode del equipo (entregado por el fabricante).

3.1.5 Modelo digital de la solución

A continuación se presenta en figura N° 8, la idea de solución para el requerimiento en un modelo digital.



Figura N° 8: Modelo de solución integrada.

3.2 Solicitaciones mecánicas

3.2.1 Carga de aire sobre superficies:

Teniendo en consideración la zona de empleo y las condiciones de viento que pueden presentarse durante la operación del radar, se considerará esta situación como la más desfavorable. El componente que será sometido a los mayores esfuerzos mecánicos será el sistema de anclaje entre el vehículo y el mástil que sostendrá el sensor a la altura requerida. El radar, montado sobre la interfaz y a una altura máxima de 8 m sobre el nivel del suelo, deberá resistir ráfagas de hasta 120 km/hr como condición más desfavorable, lo que está por debajo de los 130 km/hr señalados por el fabricante.

Para calcular la fuerza o carga del viento se debe conocer variables como la velocidad del viento, el coeficiente de resistencia para el objeto, el área y superficies que enfrentarán al viento.



3.2.1.1 Superficie del sensor:

$$S_s = L_s \times A_s \Rightarrow 0,565 \times 0,347 = 0,196 \text{ m}^2$$

Donde:

S_s : Superficie del sensor (m^2)

L_s : Largo del sensor (m)

A_s : Ancho del sensor (m)

3.2.1.2 Superficie del mástil:

$$S_m = L_m \times D_m \Rightarrow 6 \times 0,12 = 0,72 \text{ m}^2$$

Donde:

S_m : Superficie del mástil (m^2)

L_m : Largo del mástil (m)

D_m : Diámetro del mástil (m)

Por la disposición del mástil, solamente 6 de los 7,6 m estarán expuestos a la acción del viento, 1,6 m de mástil que corresponde a la sección N° 4 está protegida por la carrocería del vehículo.

El diámetro a considerar para el cálculo, como se trata de 3 de las secciones del mástil que son variables, se promediará para determinar un valor de la superficie aproximada. El promedio utilizado fue 0,12 m.

3.2.1.3 Presión del viento:

$$P_v = \frac{\gamma \times v^2}{2g} \left[\frac{kg}{m^2} \right]$$

$$P_v = \frac{1,2 \frac{kg}{m^3} \times \left(120 \frac{km}{h} \times \frac{1 \text{ hr}}{3.600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ m}}{0,001 \text{ km}} \right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$P_v = 67,957 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$$



Donde:

- P_v : Presión del viento (kg/m^2)
- ρ : Densidad del aire estándar (kg/m^3)
- v : Velocidad del viento (km/h)
- g : Constante de gravedad (m/s^2)

3.2.1.4 El momento en el sensor:

$$M_s = P_v \times S_s \times g \times h$$

$$M_s = 67,957 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \right] \times 0,196 \text{ m}^2 \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 7,6 \text{ m}$$

$$M_s = 993,053 \text{ Nm}$$

Donde:

- M_s : Momento en el sensor (N/m)
- P_v : Presión del viento (kg/m^2)
- S_s : Superficie del sensor (m^2)
- g : Constante de gravedad (m/s^2)
- h : altura del mástil (m)

$$M_m = P_v \times S_m \times g \times \frac{h}{2}$$

$$M_m = 67,957 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \right] \times 0,72 \text{ m}^2 \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \frac{7,6}{2} \text{ m}$$

$$M_m = 1.823,98 \text{ Nm}$$

3.2.1.5 El momento en el mástil:

Donde:

- M_m : Momento en el mástil (N/m)
- P_v : Presión del viento (kg/m^2)
- S_m : Superficie del mástil (m^2)
- g : Constante de gravedad (m/s^2)
- h : altura del mástil (m)



3.2.1.6 El momento total es:

$$M_t = M_s \times M_m$$

$$M_t = 993,053 \times 1.823,98$$

$$M_t = 2.817,03 \text{ Nm}$$

Donde:

M_t : Momento total (N/m)

M_s : Momento en el sensor (N/m)

M_m : Momento en el mástil (N/m)

El límite elástico del material seleccionado es de 200.000.000 N/m², el área que soportará el momento flector en el soporte del mástil es de 0,2 x 0,02 m = 0,004 m². Para esta superficie, el límite elástico se alcanza ante esfuerzos superiores a 800.000 N, muy superior a los 2.817,03 N que provoca la acción del viento sobre el sensor y el mástil.

Si bien la velocidad del viento en la zona de empleo no supera los 120 km/hr, es importante que el diseño de la estructura, principalmente soporte o interfaz mástil-chasis, soporte cargas sobre estas condiciones.

Para demostrar la funcionalidad del modelo desarrollado y la correcta selección del material, se realizó un análisis con elementos finitos en el software de modelación (ver figura N° 9 y figura N° 10).

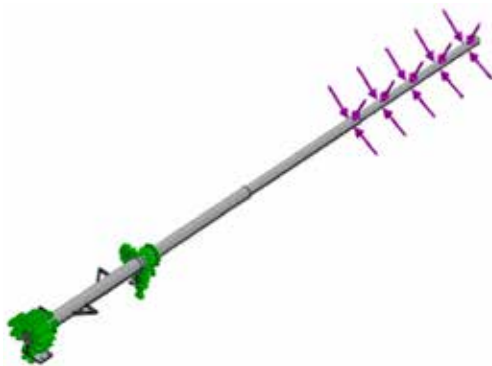


Figura N° 9: Análisis de elementos finitos.

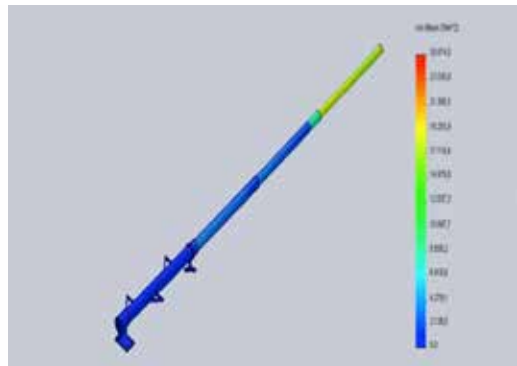


Figura N° 10: Análisis de tensión de von Mises.



Los resultados demostraron que con las cargas de viento presente en la zona de empleo, no se provocará el colapso de la estructura diseñada. Estos resultados comprueban los cálculos desarrollados con anterioridad.

4. MILITARIZACIÓN DEL VEHÍCULO

El vehículo fue transformado desde una versión civil (1.165 kg) hasta una de uso militar, el peso agregado fue de 300 kg en total, y considera: jaula de fierro, cajas y parrillas de almacenamiento y la habilitación de una estación de trabajo en la parte posterior del vehículo.

4.1 Blindaje del vehículo

Para asegurar como primera prioridad la supervivencia de la tripulación y posteriormente el equipamiento, serán reforzadas las puertas del vehículo mediante placas de kevlar y se reemplazarán la totalidad de los vidrios del vehículo.

Realizadas las comparaciones de material que se emplea para proteger ventanas y puertas de los vehículos Humvee; y determinadas las superficies a cubrir se estableció lo siguiente:

- La superficie de vidrio a cubrir en el vehículo es de 25.200 cm², lo que dará un peso del vidrio blindado de 236 kg (figura N° 11).
- En cuanto al blindaje de las puertas (rellena con láminas de kevlar) para cinco puertas da un total de 110 kg (figura N° 12).



Figura N° 11: Vidrio blindado del Humvee.



Figura N° 12: Puerta blindada del Humvee.



4.2 Pesos totales

El detalle de cada uno de los pesos de la totalidad de los componentes agregados y removidos se presenta en las siguientes tablas:

Tabla N° 3: Pesos agregados a la plataforma.

CANTIDAD DE ELEMENTOS		PESO TOTAL DISPONIBLE (1.165 kg)	
		TOTAL	DIF.
01	Militarización	300	865
04	Soldado c/ equipo	460	405
02	Radios	6,8	398,2
01	Computador	2,5	395,7
02	2 Bidones	38	357,7
01	1 Bidón de agua	21	336,7
02	2 Baterías	48	288,7
01	1 Ametralladora	7,9	280,8
01	1 Generador 1000 W	13	267,8
01	1 Sistema radar	30	237,8
01	Montaje radar	70	167,8
01	Varios	30	137,8
01	Red mimetismo	20	117,8
01	Munición 5,56	120	-2,2
01	Motor	411	-413,2
01	Sistema neumático	25	-438,2
01	Patas de apoyo	13	-451,2
01	Blindaje vidrios	236	-687,2
		110	-797,2

**Tabla N° 4: Pesos de elementos removidos.**

CANTIDAD DE ELEMENTOS		PESO TOTAL DISPONIBLE (-797,2 kg)	
		TOTAL	DIF.
01	Motor antiguo	280	-517,2
01	Vidrios antiguos	43	-474,2

De los 1.165 kg disponibles originalmente, se ha sobrepasado ese valor con los elementos agregados en 474,2 kg, dando un total de 1.637,2 kg lo que modificará las performances del vehículo (relación de peso/potencia, sistema de suspensión, etc.).

4.3 Relación peso potencia:

Para determinar la potencia en relación al peso del vehículo se analizó tanto las performance originales para el vehículo sin y con carga completa. Posteriormente se igualó esta relación para determinar la nueva potencia necesaria para mantener la relación original de diseño.

4.3.1 Relación peso potencia original sin carga

$$3.050 \text{ kg} / 122 \text{ HP} = 25 \text{ kg/HP}$$

4.3.2 Relación original con carga

$$(3.050 + 1.165) \text{ kg} / 122 \text{ HP} = 35 \text{ kg/HP}$$

1.165 kg corresponde a la máxima carga permitida por el fabricante en el diseño sin intervenir del vehículo.

4.4 Necesidades de potencia requeridas

Para determinar la cantidad de HP necesarios para mantener las relaciones peso potencia con el nuevo peso se realizaron los siguientes cálculos:

4.4.1 Performance del vehículo original sin carga

$$(3.050 + 1.637) \text{ kg} / 25 \text{ HP} = 187,5 \text{ HP}$$



4.4.2 Performance del vehículo original con carga

$$(3.050 + 1.637) \text{ kg} / 35 \text{ HP} \times = 133,9 \text{ HP}$$

Para mantener las performances en cuanto a la potencia, el motor debería a lo menos entregar 133,9 HP que equivaldría a lo necesario para desplazarse con carga completa, siendo lo ideal que se acerque lo más posible a 187,5 HP, que sería el equivalente a la relación que poseía la plataforma en su forma original sin carga.

4.5 Planta de potencia

Para suplir la diferencia de potencia del actual motor se seleccionó del mercado el motor modelo Cummins 6BTA5.9-G2 G-DRIVE DIESEL de 5,9 litros y 174 HP, (Ver figura N° 13).



Figura N° 13: Motor Cummins 6BTA5.9-G2.

Fuente: <https://www.cummins-engine.es/76bta5-9-g2>

En cuanto a las dimensiones del nuevo motor calza en el compartimiento original sin realizar modificaciones.

4.6 Refuerzo de suspensión

Debido al incremento del peso es necesario reforzar el sistema de suspensión. Para dar solución a la problemática se seleccionó un sistema neumático que se inserta en el interior del resorte de la suspensión, colocando el amortiguador de forma separada como se muestra en la figura N° 14.



Figura N° 14: Posición del amortiguador.

El nuevo sistema de suspensión (figura N° 15 y 16) posee un contenedor de aire a presión flexible que se inserta en el interior del resorte el cual tiene la particularidad de poder variar la rigidez de la suspensión de acuerdo a la cantidad de presión de aire que este recipiente contenga, de esta manera se puede cambiar a voluntad dependiendo del peso del vehículo, el tipo de terreno y tipo de conducción.



Figura N° 15: Sistema neumático de amortiguación.
Fuente: <https://www.neumaval.com>



Figura N° 16: Componentes del sistema de suspensión.
Fuente: <https://www.neumaval.com>

Para su funcionamiento cuenta con un compresor, acumulador de aire, mangueras y un panel, el cual se coloca en el interior del vehículo a la vista del conductor. Este puede regular la presión de los contenedores de aire de manera independiente.



4.7 Requerimiento eléctrico

El vehículo cuenta con tres baterías, una asociada al motor y dos para proveer alimentación durante el tiempo de la operación en silencio. Las baterías auxiliares están conectadas en paralelo con la batería principal del motor cuando este está en marcha. Durante el periodo de silencio, las baterías auxiliares requieren supervisión del nivel de energía para evitar que estas se descarguen. En la figura N° 17 se muestra el dispositivo que permite monitorear el voltaje de las baterías.



Figura N° 17: Supervisión de carga de baterías.

4.8 Capacidad de las baterías

En los cálculos de requerimientos de energía, por lo general, se asume el 80% de la capacidad de la batería declarada por el fabricante.

Las dos baterías auxiliares del vehículo tienen las siguientes características (ver figura N° 18):



Battery Model: D31M
Part Number: 8052-161
Nominal Voltage: 12 volts
NSN: 6140 01 502 4405
Description: High power, dual purpose engine start and deep cycle, sealed lead acid battery

Figura N° 18: Baterías auxiliares.

Fuente: <https://www.optimabatteries.com>



La capacidad de almacenamiento de energía de las baterías está determinada por:

$$(12 V \times 75 Ah) \times 2 = 1800 Wh$$

Si se considera un margen de seguridad del 20%: $0.8 \times 1800 Wh = 1.440 Wh$

4.9 Consideraciones de energía para las radios

El consumo de energía durante la transmisión y recepción es diferente de los equipos de comunicaciones. Se asume la proporción de transmisión-recepción 1:15. La radio utiliza 50W para transmitir y 6W para recibir, (ver figura N° 19).



Figura N° 19: Equipo de comunicaciones Tadiran VRC 980.

Fuente: <https://www.elbitsystems.com>.

4.9.1 Potencia media de consumo

$$(1/16) \times 50 W + (15/16) \times 6 W = 8,75 W$$

4.9.1.1 Requerimientos de energía (ver tabla N° 5)

Tabla N° 5: Tabla de gasto de energía.

CANTIDAD ELEMENTOS		REQUERIMIENTO Wh	
		UNITARIO	TOTAL
02	Radio	8,6	17,5
02	Computador	36	72
02	Luz interior	6	12
01	C. Térmica	120	120
01	Radar	110	110
04	Pilas AA	4	16
		Total	347,5 Wh



4.9.2 Cálculo de la autonomía energética

La misión que debe realizar el PET tiene una duración de 72 h y solo una autonomía con las dos baterías auxiliares de 4,14 h. Por lo tanto es necesario utilizar un elemento externo que proporcione la electricidad necesaria para suministrar esta diferencia.

$$\text{Tiempo (h)} = \frac{\text{Energía disponible por hora (wh)}}{\text{Consumo de energía (w)}}$$

$$\text{Tiempo (h)} = \frac{1.440}{347,5} \Rightarrow 4,14 \text{ h}$$

4.10 Determinación del generador de corriente

Para suministrar la energía requerida para el cumplimiento de la misión, se considerará un generador de 1.000 W. A continuación se realizarán los cálculos de consumo de combustible del generador, tiempo de funcionamiento del dispositivo y tiempo necesario para recargar el banco de baterías.

4.10.1 Superávit de energía disponible del generador

$$1.000 \text{ Wh} - 347,5 \text{ Wh} = 653 \text{ Wh}$$

4.10.2 Tiempo necesario en cargar las baterías auxiliares

$$1.440 \text{ Wh} / 653 \text{ (Wh/h)} = 2,2 \text{ h}$$

Un ciclo considera 4,14 h de operación, más 2,2 h de operación y carga, la cual tiene una duración de 6,34 h en total.

4.10.3 Tiempo necesario de uso del generador

$$72 \text{ h} / 6,34 \text{ h} = 11,36 \text{ ciclos} \times 2,2 \text{ h}$$
$$\text{Uso del generador} = 24,992 \text{ h}$$

5. DETERMINACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD

5.1 Centro de gravedad sin intervención

Para la determinación del centro de gravedad se procedió al pesaje de los ejes del vehículo Land Rover Defender. Posteriormente, mediante el empleo de un puente grúa



y un dinamómetro (figura N° 20), se evaluó la posición en altura del centro de gravedad, con el fin de determinar la sollicitación en el eje frontal. Estas pruebas se realizaron sin personal y simulando el peso y posición de los equipos de comunicación.



Figura N° 20: Pesaje tren delantero.
Fuente: IDIC

Para la determinación de la localización del centro de gravedad, se configuró el prototipo y se evaluó el peso en los ejes, posteriormente se introdujeron las distancias y los pesos en una planilla de autoría del Departamento de ingeniería del IDIC la cual arroja el punto donde se encuentra el centro de gravedad del vehículo sin modificaciones (ver figura N° 21).

DATOS DEL VEHÍCULO	
Dimensiones	
Radio del neumático (R)	0,403 m
Distancia entre ejes (L)	2,794 m
Pesos por ejes	
Vehículo horizontal	
Delantero (Pa)	1,080 t
Trasero (Pb)	1,420 t
Vehículo inclinado	
Delantero (Pc)	0,760 t
Angulo de inclinación (α)	21 °

RESULTADOS	
Altura del c.d.g. (h)	1,33 m
Distancia al eje delantero (a)	1,59 m
Distancia al eje trasero (b)	1,21 m

Figura N° 21: Ubicación del centro de gravedad.
Fuente: IDIC



5.2 Centro de gravedad vehículo intervenido

En la distribución del peso de las modificaciones efectuadas, se realizó de tal forma que quedo equiparado el peso al interior del vehículo (ver tabla N° 6).

Tabla N° 6: Peso del nuevo equipamiento.

ELEMENTO		kg
01	Militarización	300
04	Soldado c/ equipo	460
02	Radios	6,8
01	Computador	2,5
02	2 Bidones (1 diésel, 1 gasolina)	38
01	1 Bidón de agua	21
02	2 Baterías	48
01	1 Ametralladora	7,9
01	1 Generador	13
01	1 Sistema radar	30
01	Montaje radar	70
01	Varios	30
01	Red mimetismo	20
6000	Munición 5,56	120
01	Motor	411
01	Sistema neumático	25
01	Sistema patas de apoyo	13
01	Blindaje vidrios	236
01	Blindaje puertas	110



Supuestos:

- a) El centro de gravedad no se movió de su eje longitudinal.
- b) Se asume que la totalidad del peso extra que se encuentra desde el centro de gravedad hacia adelante es absorbido por el eje delantero y del centro de gravedad hacia atrás por el trasero.
- c) Con respecto a la altura de los elementos se asume la misma que tenía en el centro de gravedad original.

Nuevo peso en el eje delantero:
 $1499 + 534 = 2.033$

Nuevo peso en el eje trasero:
 $1972 + 718.5 = 2.690$

Reemplazando los nuevos datos obtenemos:

Centro de gravedad desde el eje delantero:
1.591 mm

Centro de gravedad desde el eje trasero:
1.203 mm

6. ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

Para el funcionamiento del radar, equipos complementarios y equipos de comunicaciones, se analizó los posibles efectos de interferencia electromagnética que pueden causar los componentes de radio y computadores que interactúan con el radar, los que de acuerdo a la documentación técnica analizada, son compatibles conforme a las normas MIL-STD 461-E.

- a) Las perturbaciones electromagnéticas generadas quedan limitadas a un nivel que permita a los equipos de radio y de telecomunicaciones u otros equipos funcionar con el fin para el que han sido fabricadas.
- b) El nivel de protección adecuado frente a las perturbaciones electromagnéticas previsibles que permita al equipo funcionar sin una degradación inaceptable en su uso previsto.



7. ANÁLISIS ERGONÓMICO

En el desarrollo de la integración del sistema de armas, los aspectos de ergonometría se centran en el habitáculo del operador del radar que se encuentra ubicado en la parte posterior trasera del vehículo. El resto de los habitáculos de la tripulación no se han analizado, debido a que en esta integración estos emplazamientos no sufrieron modificaciones (ver figura N° 22)



Figura N° 22: Interior Land Rover Defender.

Los aspectos analizados, para no degradar el desempeño del operador, las condiciones fisiológicas y minimizar la fatiga del personal, tienen relación con los elementos de interfaz hombre máquina, factores humanos y su interacción con la tecnología, fueron los siguientes:

- Distancias y espacios disponibles dentro del habitáculo, desplazamiento de hombros, codos, movimiento de cabeza, cuello, además de la línea de visión del operador considerado la aplicación de la Norma MIL STD 1472F que establece distancias mínimas y máximas de posición de displays de los computadores.
- Distancia y estiramiento de las piernas en posición sentado, para lo cual, se ha considerado la aplicación de la Norma MIL STD 1472F, lo anterior debido al efecto que causa mantener las rodillas flexionadas durante un periodo prolongado de tiempo.
- Levantamiento de pesos y trabajo con brazos estirados, dentro del concepto de movimiento funcional de los brazos, el cual también se considera la Norma MIL STD 1472F, considerando que el operador de radio debe trabajar durante periodos prolongados de tiempo utilizando sus brazos para operar y manipular el computador y los equipos del radar.
- Respecto de la emisión de ruido, conforme a norma ISO Technical Report 3352-1974, se han considerado las distancias adecuadas entre los miembros de la tripulación del vehículo, para evitar la propagación de ruido entre emisores y receptores con el propósito de lograr una efectiva comunicación, considerando que el vehículo no posee sistemas de intercomunicación internos.



8. CONCLUSIONES

En cuanto a los antecedentes de la doctrina evaluados se puede concluir que no existe una definición respecto de la forma de empleo de los elementos técnicos y de las plataformas vehiculares sujetas al análisis, lo cual, desde el punto de vista de la integración no representa una limitación considerando la doctrina de empleo. Por lo tanto, cualquier iniciativa de integración del radar GO-12 sobre la plataforma Vehículo Land Rover Defender 130, permitirá contribuir a los principios de empleo del sistema de armas respecto de las misiones que le compete.

Dado que existen por una parte, condiciones técnicas iniciales de los equipos y plataformas vehiculares que se deben integrar, y por otra parte definiciones doctrinarias muy amplias respecto del empleo de los medios técnicos de los PET, se asumen en el estudio que las características de performances en cuanto la autonomía, dimensiones y capacidades para transporte de personal del vehículo, satisfacen los requerimientos de utilización en función de las misiones definidas doctrinariamente.

Los programas de modelación permiten, entre otras aplicaciones, simular, observar y analizar el movimiento de mecanismos. A través de una interfaz gráfica en 3D es posible observar los conjuntos modelados y observar el movimiento de éstos, entregando una serie de datos relevantes para las experiencias físicas y matemáticas. Además, optimizan y validan el funcionamiento del producto antes de la fabricación. Los análisis de simulación de movimiento y de tensión están estrechamente integrados, lo que ayuda a predecir el funcionamiento del diseño en condiciones reales, con el consiguiente ahorro de tiempo y costos en prototipos. Al mismo tiempo, ello contribuye a dar seguridad y solidez a los diseños.

Finalmente las consideraciones, cálculos y modificaciones propuestas en el estudio desarrollado, es factible incorporar a la plataforma vehicular del PET un sistema de vigilancia para incrementar la capacidad de esa unidad. Esto debe estar acompañado de las consideraciones expuestas para no degradar el performance del vehículo, equipos y la seguridad de la tripulación en el cumplimiento de las misiones de exploración asignadas a este tipo de unidades.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CRANFIELD UNIVERSITY, (1996) Ammunition Technology, volumen 1, The ammunition systems & explosives technology unit.
- [2] WONG, J.Y. (2008). Theory of ground vehicles. New York: John Wiley & Sons, Inc.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**DISEÑO DE DETALLE DE UN POLÍGONO DE TIRO VIRTUAL
INALÁMBRICO, MODULAR Y TRANSPORTABLE PARA
FUSIL GALIL**



DISEÑO DE DETALLE DE UN POLÍGONO DE TIRO VIRTUAL INALÁMBRICO, MODULAR Y TRANSPORTABLE PARA FUSIL GALIL

CAP. Jorge Vásquez Albornoz¹
Sr. Julio Astudillo Campos²

Resumen: *La simulación para el entrenamiento es uno de los tres mecanismos contribuyentes para el desarrollo de cualquier sistema que se desee representar. Bajo esta premisa, el Ejército asumió el desafío de desarrollar un simulador modular de tiro, transportable e inalámbrico para armamento menor, con el fin de apoyar la instrucción y entrenamiento militar mediante simulación virtual.*

El presente artículo expone el diseño y desarrollo de un polígono de tiro virtual desarrollado por el Centro de Modelación y Simulación del Ejército (CEMSE), en conjunto con las Fábricas y Maestranzas del Ejército (FAMAE), constituyéndose en el primer desarrollo Institucional de este tipo, que contribuirá significativamente al entrenamiento de la Fuerza Terrestre. El artículo pretende exponer los métodos y criterios de diseño usados, la tecnología aplicada y los algoritmos inmersos en su desarrollo.

Palabras clave: *Cálculo balístico, Desarrollo de software, Sensorización, Simulación para el entrenamiento militar, Visión artificial.*

Abstract: *Military training simulation is one out of three mechanisms that contribute to the Chilean development from the defense sector. In that sense, Chilean Army took the challenge to design and develop by their own a modular, transportable and wireless virtual shooting range for the new standard rifle Galil 22 ACE N-C, in order to support technologically to the Training through simulation. The following paper presents a virtual shooting range design and development by the Modeling and Simulation Center of the Chilean Army and the Chilean Armories and Factories. It*

-
- 1 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Mecánica. Master of Science in Mechanical Engineering. Master of Science in Computational Design and Manufacturing.
 - 2 Ingeniero Civil Mecánico. Master of Science in Energy Science.



is the first completely Chilean-Army developed simulator for the Land Forces. This article pretends to exposes design criteria and methods, technology applied and algorithms immersed.

Key words: *Calculus, Software development, Sensing, ballistic Military training simulation, Computer vision.*

1. INTRODUCCIÓN

La simulación para el entrenamiento militar comienza antes de la Primera Guerra Mundial con los Juegos de Guerra desarrollados por el alto mando del Ejército de Prusia (*Kriegsspiel*) (“History of Wargames: Toward a History Based Doctrine for Wargaming”, 2000), pero no es hasta la década de los 80’s, cuando el Ejército de los Estados Unidos implementa el uso de simuladores virtuales en sus entrenamiento de habilidades de combate, mediante el desarrollo del simulador de combate multipropósito (*Multipurpose Arcade Combat Simulator, MACS*) y el entrenador de habilidades de combate (*Engagement Skill Trainer, EST*).

Los polígonos de tiro virtual son una herramienta fundamental de apoyo para la mejora de las capacidades de tiro en los diferentes ejércitos del mundo, usados en instrucción, acreditación, capacitación y entrenamiento de los combatientes individuales de todos los grados. En la institución, sólo contamos con un polígono virtual para armamento menor instalado en la Escuela Militar, el cual posee características alámbricas (red de aire).

La tecnología ha evolucionado y hoy, la gran mayoría de los polígonos de tiro virtual emplean acelerómetros, giróscopos, sensores magnéticos, cilindros de aire comprimido y un dispositivo láser adicionados al arma, con el propósito de posicionar el impacto del tiro, retroalimentar al tirador con un reporte y ejecutar el carguío inalámbricamente. Poseen además motores de cálculo que ejecutan ecuaciones balísticas para simular la trayectoria del proyectil al momento de abandonar el cañón. Como resultado de esta sincronía, se obtiene una estimación precisa de la posición de impacto del proyectil dentro de la silueta proyectada en forma virtual.

Descripción General

Para el diseño de este sistema se utilizó la metodología de Ingeniería de Sistemas, por lo cual se dividió el proyecto en tres fases principales: diseño conceptual, diseño preliminar y diseño de detalle como se indica en la figura N° 1. Cabe destacar, que para este proceso se utilizaron delegados de distintas unidades atingentes al proyecto.

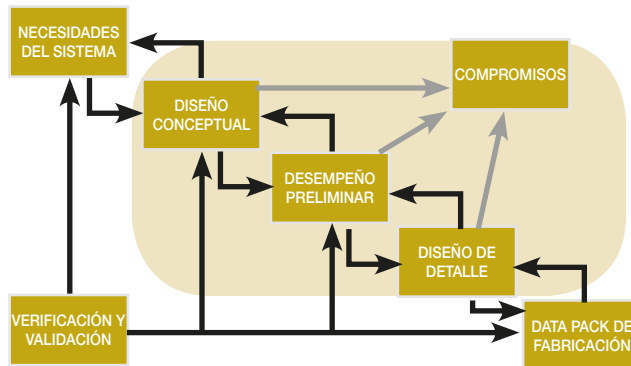


Figura N° 1: Fases del proyecto de desarrollo.

Durante la primera fase del diseño, y conforme al análisis funcional, se conformaron las funciones del sistema, los criterios de diseño: robustez, modularidad, escalabilidad y sencillez, además se generó la composición del sistema con sus respectivos subsistemas y relaciones, desagregándose en tres subsistemas: arma, entorno e interfaz, como se visualiza en la figura N° 2.

El subsistema “arma”, capaz de generar el retroceso, el carguío mediante elementos mecánicos y la acción de apuntar el fusil mediante un láser tipo industrial codificado. El subsistema “interfaz”, que es capaz de percibir mediante elementos sensibles del tipo mecánico y magnético, además de un módulo integrado con un acelerómetro y transmitir, de esta manera, información al *Gateway* del servidor mediante un micro controlador inalámbrico con tecnología *zigbee*³ y el subsistema “entorno”, que es capaz de captar el pulso láser a través de algoritmos de visión artificial, proyectar la realidad virtual y retroalimentar al tirador a través de un software.

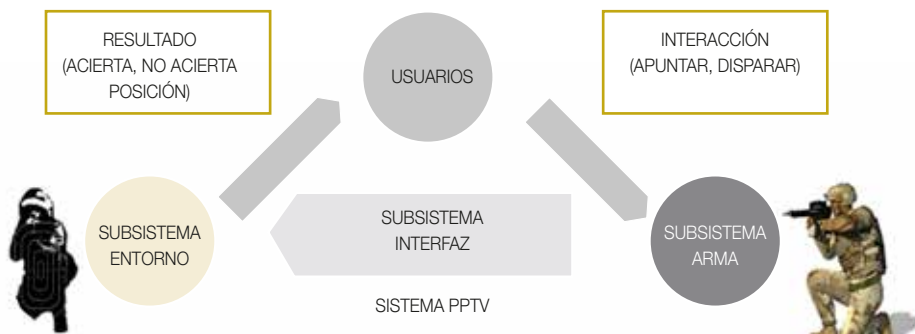


Figura N° 2: Composición del sistema.

3 Tecnología inalámbrica para pequeños paquetes de información y maximización de la vida útil de las baterías.



Motor físico del sistema

Se entenderá por motor físico del simulador a los cálculos balísticos para identificar las coordenadas de impacto, corrección de la coordenada por inclinación del fusil y la corrección de la coordenada usando ecuaciones balísticas que interpretan las características del proyectil, del fusil, la distancia al objetivo y las condiciones atmosféricas.

1.1 Determinación de la coordenada de tiro utilizando dispositivo láser

La detección de las coordenadas (ver figura N° 3) a la cual el tirador está apuntando se realiza mediante un dispositivo láser instalado en el cañón del arma, una cámara de detección junto al proyector y un algoritmo de procesamiento de imágenes o visión artificial del software (ver figura N° 4).

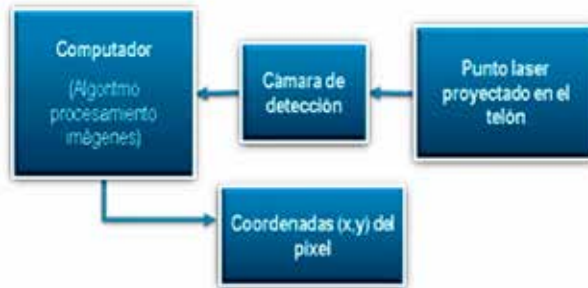


Figura N° 3: Proceso de detección de haz de láser.

Para el procesamiento de imágenes se utiliza la librería Open CV (Open Computer Vision).

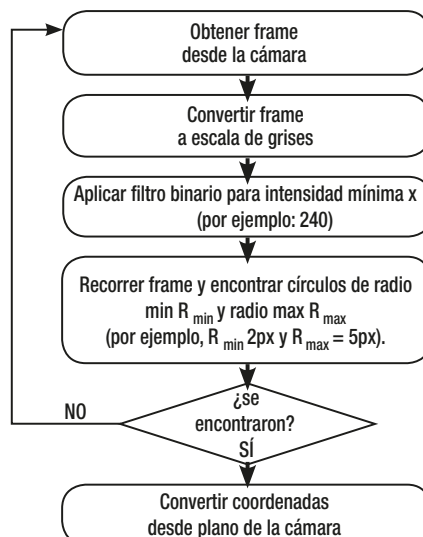


Figura N° 4: Algoritmo de detección punto láser.



La coordenada del haz de láser en el telón corresponde a la coordenada a la cual el cañón del fusil está apuntando, sin embargo, para efecto de cálculo balístico, se requiere saber la coordenada a la cual el punto de mira del fusil está apuntando. Estas coordenadas se calculan utilizando la siguiente ecuación:

$$X_{\text{punto_mira}} = X_{\text{laser}} + \text{offset}_x \quad (1)$$

$$Y_{\text{punto_mira}} = Y_{\text{laser}} + \text{offset}_y \quad (2)$$

$X_{\text{punto de mira}}$ = Corresponde a las coordenadas donde el tirador está apuntando.

X_{laser} = Corresponde a las coordenadas reales donde está impactando el láser.

Offset = Se denomina a las coordenadas compensadas por calibración del tirador.

Ecuaciones (1) y (2) para el cálculo de coordenadas del punto de mira del fusil

El *offset* en los ejes X e Y se obtienen durante el proceso de colimación del arma a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Offset}_x = X_{\text{punto referencia}} - \frac{X_{\text{tiro1}} + X_{\text{tiro2}} + X_{\text{tiro3}}}{3} \quad (3)$$

$$\text{Offset}_y = Y_{\text{punto referencia}} - \frac{Y_{\text{tiro1}} + Y_{\text{tiro2}} + Y_{\text{tiro3}}}{3} \quad (4)$$

*Offset*_x = coordenada x e y compensada.

X, *Y punto referencia* = coordenada x e y del punto de referencia (círculo rojo).

Ecuaciones (3) y (4) para el cálculo de colimación del punto de mira del fusil.

Según las ecuaciones (3) y (4) se deben realizar 3 tiros hacia un punto de referencia al cual el punto de mira está registrando. La diferencia entre la coordenada del punto de referencia y el promedio de las coordenadas de los tres tiros nos entrega el *offset* promedio entre el cañón y el punto de mira del fusil.

La posición del impacto del tiro dentro del blanco con respecto a algún punto de referencia (X_{ref} , Y_{ref} , usualmente el centro del blanco de anillas o silueta de ataque) se calcula utilizando las siguientes ecuaciones:

$$dX_{ref} = (X - X_{ref}) * \frac{\text{distancia_blanco}}{\text{distancia_ref}} \quad (5)$$

$$dY_{ref} = (Y - Y_{ref}) * \frac{\text{distancia_blanco}}{\text{distancia_ref}} \quad (6)$$



dX_{ref} = desviación de x e y de referencia.

distancia blanco = distancia del blanco.

distancia _ref = distancia de referencia.

Ecuaciones (5) y (6) para el cálculo de las coordenadas según distancia a la silueta.

En las ecuaciones (5) y (6) las coordenadas X, Y, Xref e Yref están medidas en pixeles, la distancia de referencia es un parámetro fijo y usualmente corresponde a la distancia a la cual el blanco será proyectado al momento de calcular los resultados (por ejemplo 4 m). Si X, Y es igual a (Xref, Yref), entonces no existe desviación ($dX_{ref}=0$, $dY_{ref}=0$) con respecto al punto de referencia en el blanco. Lo anterior implica que, si el punto de referencia corresponde al centro del blanco, entonces el impacto dio en el centro de este.

La desviación dX_{ref} o dY_{ref} aumenta a medida que la distancia del blanco proyectado se incrementa. Por ejemplo, para el caso de un blanco proyectado a 100 m, una diferencia X - Xref es igual a 1 pixel corresponde a una desviación dX_{ref} es igual a 25 pixeles. Para el caso de blanco proyectado a 300 m, la desviación dX sería igual a 75 pixeles. Lo anterior define la precisión del sistema láser, debido a que la máxima precisión de la cámara de video es +/- 1 pixel. En este caso, a 100 m existen 25 pixeles de incertidumbre en la coordenada de impacto dentro del blanco proyectado a 4 m. En el caso de 300 m., la incertidumbre es igual a 75 pixeles.

Tabla N° 1: Precisión en la detección de coordenadas mediante sistema láser*.

* Se asume un telón de tamaño 3.600 x 100 mm, resolución de la cámara 1.280 x 720 pixeles, y una distancia referencia igual a 4 m.

DISTANCIA [m]	PRECISIÓN X [mm]	PRECISIÓN Y [mm]
4	+/- 1.4	+/- 1.5
25	+/- 8.8	+/- 9.1
50	+/- 17.6	+/- 18.2
100	+/- 35.2	+/- 36.5
200	+/- 70.3	+/- 72.9
300	+/- 105.5	+/- 109.4



1.2 Corrección coordenada de tiro utilizando acelerómetros

Con el objetivo de reducir las incertidumbres presentadas en la tabla N° 1, los sistemas de simulación a menudo incorporan acelerómetros y giróscopos con el fin de medir la posición e inclinación del fusil al momento del disparo.

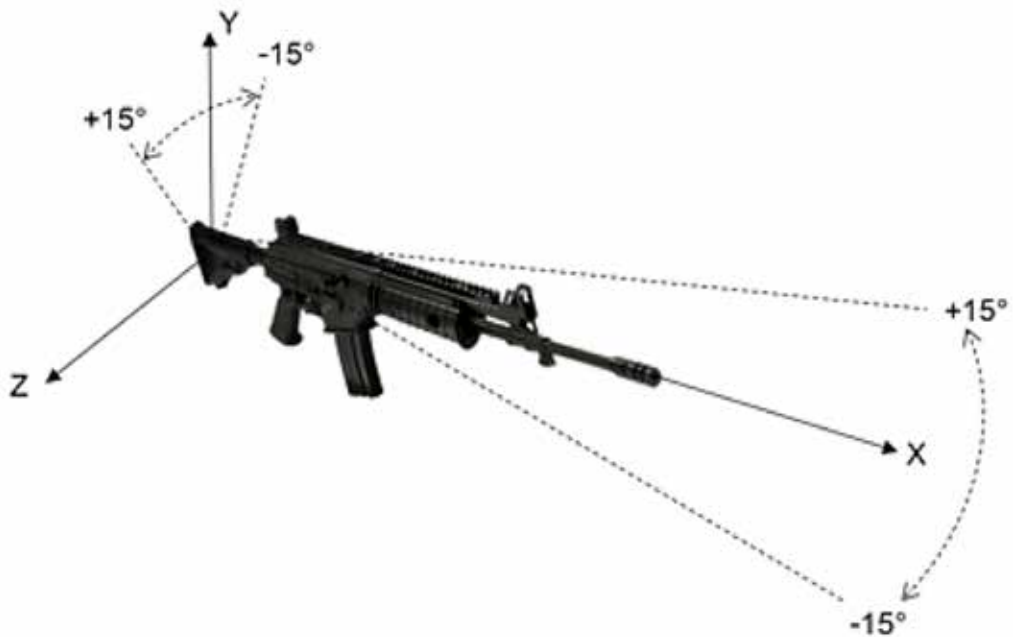


Figura N° 5: Ángulos medidos por el acelerómetro en el fusil.

Los acelerómetros también poseen incertidumbre en su medición (ver tabla N° 2) lo cual depende de la distancia a la cual se proyecta el blanco, el rango de medición, y la precisión del ADC (Analog to Digital Converter). Según la figura N° 5, el rango de medición en cada eje es de +/-15°. Si la precisión del convertidor análogo digital (ADC) es de 12 bits, i.e. 0-4096, se tiene que la resolución angular es igual a 0.0073° dado por la fórmula:

$$Precisión \left[\frac{mm}{ADC} \right] = distancia_{objetivo} * TAN\left(\frac{30^\circ}{4096}\right) \quad (7)$$

**Tabla N° 2: Precisión en la detección de coordenadas mediante acelerómetros.**

DISTANCIA (m)	PRECISIÓN (mm)
4	+/- 0.25
25	+/- 1.59
50	+/- 3.19
100	+/- 6.39
200	+/- 12.78
300	+/- 19.17

La medición entregada por los acelerómetros al momento del disparo permite corregir la coordenada (dX_{ref} , dY_{ref}) entregada por el sistema láser. La corrección se hace mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta X = \frac{(A_{ADCx} - A_{pixelx})}{DA_x} * PrecisionPixel_x \quad (8)$$

$$\Delta Y = \frac{(A_{ADCy} - A_{pixely})}{DA_y} * PrecisionPixel_y \quad (9)$$

Ecuaciones (8) y (9) segunda corrección de coordenadas mediante acelerómetro.

A_{ADC} y A_{pixel} corresponden a la inclinación del fusil y el ángulo del pixel respectivamente. Los factores DA_x y DA_y son obtenidos por calibración.

1.3 Corrección coordenada de tiro utilizando ecuaciones de balística exterior

Para realizar el ajuste de las coordenadas del tiro se toman en cuenta los siguientes elementos:

- Distancia al blanco de anillas o silueta de ataque.
- Distancia de colimación del fusil.
- Velocidad del viento (km/h).
- Dirección del viento.
- Función de arrastre del proyectil.
- Coeficiente balístico del proyectil.
- Velocidad inicial del proyectil (m/s).
- Altura de la mira con respecto al cañón del fusil.



El cálculo del desplazamiento se realiza con respecto a la línea de mira del proyectil, y considera el desplazamiento en el eje vertical del proyectil debido al efecto de la gravedad y el desplazamiento en el eje horizontal debido al efecto del viento (ver figura N° 6).

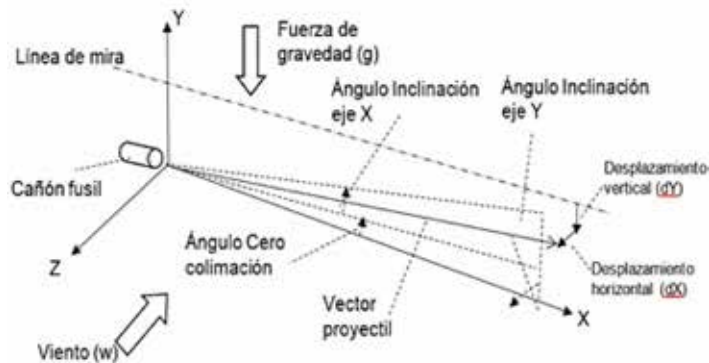


Figura N° 6: Diagrama balística del proyectil.

Los desplazamientos en el eje vertical (Y) y horizontal (X) se obtienen resolviendo la siguiente ecuación de movimiento:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{p}{p_0} * \frac{G(v)}{c} * (\mathbf{v} - \mathbf{w}) + \mathbf{g} \quad (10)$$

Ecuación (10): Ecuación de movimiento para cálculo de los desplazamientos en X e Y.

Donde:

v : Velocidad del proyectil respecto del suelo [m/s].

w : Velocidad del viento respecto del suelo [m/s].

g : Aceleración de gravedad [(x=0, y=-9.68 m²/s, z=0)].

p : Presión atmosférica [Pa].

p_0 : Presión atmosférica a nivel del mar [101.33 kPa].

$G(v)$: Función de arrastre del proyectil, el cual depende de la velocidad del proyectil.

C : Coeficiente balístico del proyectil.

w, p : dependen del tipo de escenario, y $G(v), C$, del tipo de proyectil disparado.

Existen diversas correlaciones desarrolladas empíricamente para $G(v)$. Existen siete tipos de correlaciones para G : G1, G2, G5, G6, G7 y G8. El valor de G depende



de la velocidad del proyectil en un momento dado. Todas las correlaciones poseen la siguiente forma:

$$G = A(v) * v^{M(v)} \quad (11)$$

Ecuación (11): Ecuación para calcular G.

Dónde:

$A(v)$ y $M(v)$ son valores de correlación dependientes de la velocidad del proyectil.

1.4 Corrección balística total

Después de utilizar estos tres mecanismos, se realiza la corrección final para estimar la coordenada de impacto de un tiro simulado en el polígono de tiro virtual que se presenta.

La coordenada total del tiro se obtiene al combinar la contribución de cada uno de estos mecanismos (ecuaciones 5, 6, 8, 9, y 10):

$$X = X_{ref} + dX_{ref} + \Delta X + \Delta X_{balística} \quad (12)$$

$$Y = Y_{ref} + dY_{ref} + \Delta Y + \Delta Y_{balística} \quad (13)$$

Ecuación (11) y (12): ecuación para el cálculo de la coordenada final.

Subsistema interfaz

El subsistema interfaz se encuentra dentro del subsistema arma y se encarga de sensor y enviar la información de los eventos del fusil al servidor con la intención de disponer al software de información relevante. Esta información es procesada por el subsistema entorno para identificar la ubicación exacta de cada impacto, para conocer el estado del fusil y el conteo de disparos.

1.5 Componentes del subsistema interfaz

El subsistema interfaz está compuesto por dos componentes principales: uno encargado de la captación de eventos y el otro del envío de datos. Cada uno de estos componentes conforma la parte funcional e interactúan como muestra la figura N° 7.



Figura N° 7: Esquema de interacción de la información.

1.6 Características electrónicas del subsistema interfaz

Para la captación de inclinación se diseñó un circuito impreso, integrado al módulo del acelerómetro, ubicado en el vástago de la culata del fusil, de forma horizontal para obtener una medición correcta de la inclinación en el eje x e y del fusil. Este módulo es el encargado de corregir la precisión balística. Esta corrección adquiere relevancia cuando las distancias de tiro son mayores, por lo que en un pixel existen varios puntos de disparo.

Existe otra placa impresa que recibe el resto de los eventos captados por elementos sensibles como la presión en el disparador, el cargador, preparador, selector de tiro, disparador y del módulo integrado de acelerómetro sostenidos en la caja de los mecanismos ubicada dentro de la empuñadura, la cual tiene además la función de enviar datos mediante un micro controlador de comunicación inalámbrica con tecnología zigbee (Xbee PRO S2B). Además, se encarga de controlar el encendido del láser cuando el fusil está totalmente preparado para ser utilizado para la sesión de tiro.

Las dos placas impresas se alimentan por una batería de ion litio que entrega un voltaje de 3.7 V DC y 1100 mAh. Esta batería se carga en forma interna, conectándose a un cargador de 5V DC a la entrada hembra ubicada en la superficie inferior de la empuñadura. Se estima una autonomía de la batería de aproximadamente 10 horas de uso continuo, con láser encendido, lo que mantiene un rango considerable para una jornada de 8 horas de uso continuo del polígono.

El Subsistema interfaz posee tres luces indicadoras, una de conexión establecida, la cual se mantiene encendida si y solo si la Xbee se conectó satisfactoriamente al Gateway, otra que indica el estado del switch ON/OFF y la de estado de carga, que se enciende mientras la batería se encuentra en proceso carga y se apaga cuando acaba.

La conexión entre los sensores y la unidad de envío de datos se hace a través de cable plano de 10 pines, mientras que la del acelerómetro se hace por cable plano de 6 pines.



1.7 Características de disposición



Figura N° 8: Indicación de lugares físicos de los circuitos impresos (*Printed Circuit Board, PCB*).

El cajón de mecanismos contiene en su interior los sensores ubicados de tal forma de que sea fácil el cambio (ver figura N° 8), además, están montados sobre una base especialmente construida y conectado a una placa de envío de datos a través de un conector, lo que hace que estos sean completamente modulares, removibles y desechables en caso de falla. Este criterio de diseño, además, permite tener un stock de sensores con sus respectivas bases y conectores. Por consiguiente, en caso de falla, se realizará un reemplazo rápido y sencillo para disponer nuevamente el sistema en operación con una nueva sesión/lección de tiro.

La culata, por su parte, contiene el circuito del acelerómetro, el cual envía información de la inclinación en x e y del fusil para corregir la precisión balística. Se eligió ese lugar físico porque cumplía con las condiciones de ser capaz de contener al circuito y de mantenerlo de forma horizontal y de esa forma obtener una medición lo más certera posible.

Los dos puntos anteriores se comunican directamente a través de cable plano hacia la placa de envío de información ubicada en la empuñadura del fusil junto con la batería. Esta placa envía la información hacia el *Gateway*. Se debe agregar que son el de carga de batería compuesto por el integrado por microcontrolador tipo MCP73831, y adjuntarla con el circuito del acelerómetro y los sensores. Una vez funcionando en conjunto y haciendo el envío correcto de información se fabricó en doble capa por proceso químico y con acabado profesional.



Se desarrollaron las bases soporte de sensores en aluminio, las que se fijan mediante tornillos de diámetro 2mm cabeza *allen*, que otorgará una mejor estética exterior y una menor probabilidad de ser removidos intencionalmente.

Se montan los sensores y se conectan los circuitos, se revisa que funcione todo y se realizan pruebas de tiro continuo, comprobándose la robustez del montaje ante vibraciones.

Diseño del Software

Este subsistema se encarga de controlar la interacción entre los demás subsistemas, además de manejar el flujo de información que corre dentro del sistema PPTV (Proyecto Polígono de tiro virtual) completo. Aquí se maneja la información de los sensores dispuestos en cada fusil, la información recopilada por la detección de imágenes desde la cámara infrarroja, la información almacenada en base de datos del sistema PPTV y la información producida por el software luego de la ejecución de las sesiones de entrenamientos.

1.8 Flujo de información en el subsistema entorno

Como todo proceso informático, el funcionamiento del subsistema entorno, se basa en un flujo estándar que cuenta con una entrada, un procesamiento de la información y una salida. En este flujo intervienen los tres subsistemas que conforman en su totalidad el sistema PPTV, teniendo como entrada principal, la información recibida desde los fusiles (sensores) y la detección de imágenes a través de la cámara infrarroja; por otro lado en el procesamiento de esta información, el software de control es el encargado de manejar la representación de los tiros realizados con el fusil hacia una proyección generada a través de un proyector, en la cual se visualiza el ambiente simulado de un polígono de tiro. Dentro de este procesamiento el software se encarga de detectar el láser instalado en el fusil, la actitud de los tiradores en cada movimiento previo al tiro realizado, lo que se compara con el doctrinal dispuesto en el reglamento de instrucción respectivo. Finalmente se retroalimenta al personal instruido conforme al esquema que se visualiza en la figura N° 9.



Figura N° 9: Flujo de información del subsistema entorno.



1.9 Características del software

El software de subsistema entorno se divide en tres módulos, los que se describen a continuación:

- **Módulo de captura de imágenes:**

Este módulo se encarga de capturar y procesar la información recibida desde la cámara infrarroja de detección dispuesta en el sistema PPTV. Esta cámara capta el movimiento del láser adosado al fusil, a través del posicionamiento del mismo, cuando es proyectado en el telón.

Esta cámara distingue los distintos tonos de color dentro de la proyección, diferenciando ubicación del láser en cada momento mientras se ejecuta la sesión de entrenamiento, permitiendo al software de control responder gráficamente ante los eventos del disparo.

Para el procesamiento de estas imágenes, se ocupa la librería OpenCv de C# (librería gratuita para visión artificial), con la cual se desarrollaron ciertos métodos para la recepción y captura de información entregada por la cámara. Todo esto ejecutado dentro de un *Thread* o hebra, en base al siguiente extracto de código fuente:

```
“Image<Bgr, Byte> imgOriginal;  
// obtiene el siguiente fram desde la camara  
imgOriginal = capWebcam.QueryFrame();  
//La cámara axis, en su modo infrarojo, funciona en escala de grises.  
imgProcessed =imgOriginal.Convert<Gray, byte>();  
//valores min y max del filtro  
imgProcessed =imgProcessed.InRange(new Gray(240),  
new Gray(256));”
```

Con esto se puede empezar a procesar la imagen recibida desde la cámara y así detectar el movimiento del láser en cada segundo, a través de la lectura simple de cuadros o *frames*.

- **Módulo de captura de eventos en el fusil:**

Este módulo recibe y procesa toda la información entregada por los sensores dispuestos en los distintos fusiles dentro del sistema PPTV. La forma de recepción se hace a través de paquetes de información, los cuales contienen información sobre los



sensores, sobre el evento de disparo, y la presión ejercida en el disparador por cada tiro, lo que es reportado por el acelerómetro que indica la posición del fusil antes de cada disparo.

Con esta información el software recrea los disparos realizados en un blanco proyectado en un telón o pantalla, además de establecer configuraciones ambientales a las cuales son sometidos los proyectiles cada vez que viajan por el aire desde el arma hasta su blanco; buscando así recrear lo más real posible un entrenamiento físico dentro de un polígono de tiro. Todo lo cual es simulado a través del uso de ecuaciones matemáticas y teorías físicas acerca del movimiento de proyectiles.

La información se transmite a través de dispositivos de conexión inalámbrica, conocidos como *Xbee*, dispuestos en los circuitos eléctricos diseñados para los fusiles y dentro de un *Gateway* de recepción dispuesto en el subsistema Interfaz. Esta recepción, al igual que la captura de imágenes, se realiza a través de un *thread* o hebra de lectura que maneja una conexión UDP entre el servidor y el *Gateway*, a través del siguiente extracto de código (previo a una configuración de puertos realizado para la conexión).

```
IPHostEntry ipHostInfo;  
IPAddress ipAddress;  
IPEndPoint remotIPEndPoint;  
ipHostInfo = Dns.GetHostEntry(Dns.GetHostName());  
ipAddress = ipHostInfo.AddressList[1];  
int servPort = 5000;  
client = new UdpClient(servPort);  
remotIPEndPoint = new IPEndPoint(IPAddress.Any, 0);  
byte[] byteBuffer;  
//recibe un arreglo de bytes con los paquetes de informacion desde el gateway  
byteBuffer = client.Receive(ref remotIPEndPoint);  
serverMessage = Encoding.ASCII.GetString(byteBuffer,0,byteBuffer.Length);
```

Una vez recibida la información por el servidor, esta es procesada por distintos métodos que obtienen la información propiamente tal.

- **Módulo de procesamiento de información:**

Este módulo es el encargado de manejar toda la información obtenida desde la captura de imágenes y la captura de datos desde los sensores del fusil, para finalmente entregar resultados en cada sesión de entrenamiento que se realice dentro del sistema



PPTV. Dentro de este módulo se llevan a cabo todos los cálculos matemáticos, físicos y de precisión antes mencionados para una correcta representación real de una sesión de tiros, tomando en cuenta ambientes, condiciones climáticas, distancias de tiro, entre otros factores.

Importante dentro de este módulo es el manejo de la información obtenida luego de la captura del láser en la pantalla, ya que es con esto con lo que se representaran los tiros realizados y se tomara la base para la entrega de resultados posterior a cada sesión. Se podría decir que este es el punto más importante dentro del sistema PPTV. En paralelo a esto se procesa toda la información de los sensores, almacenando información sobre la presión del disparador, el movimiento del fusil, la puntería del tirador y la preparación del arma para un tiro correcto. Así el software recrea los disparos, el cálculo de puntaje, porcentajes de aprobación, cantidad de tiros acertados por sesión, escalamiento de blancos a distancia y todo lo necesario para la entrega de resultados según lo establecido en los requerimientos del sistema.

En la figura N° 10 se puede apreciar una demostración de los resultados para una sesión de entrenamiento libre a 25 m. de distancia, con un blanco de siluetas.

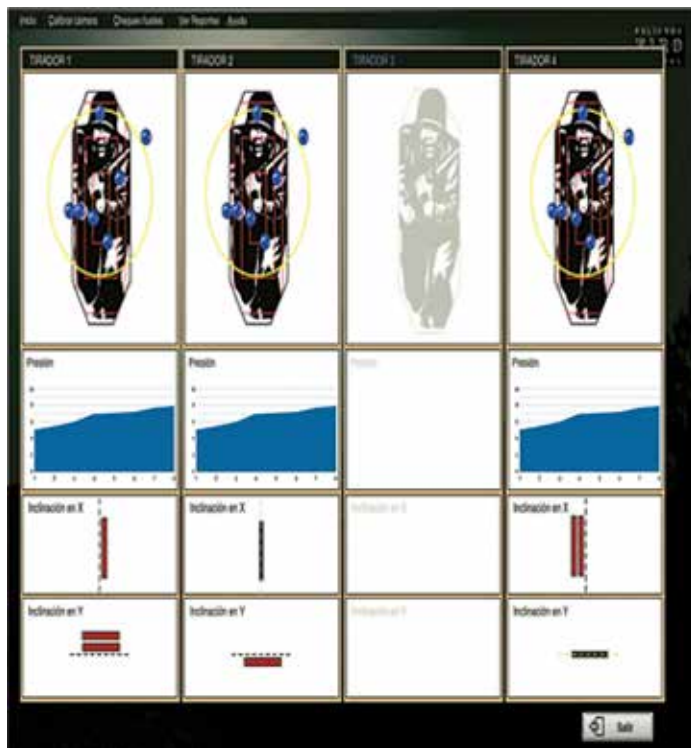


Figura N° 10: Entrega de resultados.



Toda esta información puede ser almacenada en una base de datos diseñada en *MySQL* para el sistema PPTV, información que puede ser ocupada para futuros reportes según las necesidades establecidas. En esta base de datos también se maneja la información de las sesiones, los usuarios (administrador, operadores y tiradores), sobre los tipos de blanco establecidos, condiciones ambientales. Quedando abierta a futuras modificaciones para todo lo necesario en el funcionamiento del sistema PPTV.

SOPORTE

Un punto importante dentro del diseño del sistema PPTV es el soporte futuro, es por esto la importancia que tiene la fabricación modular de todos los subsistemas/ componentes y piezas que lo componen. Se proyecta una gran demanda por parte del Ejército y el tiempo muertos entre fallas deben ser casi cero, es por esto, que se desarrollará una cartilla de mantenimiento y manuales para el correcto uso del usuario para que la persona encargada pueda ser capaz de identificar la zona exacta que presenta una falla de acuerdo a los síntomas que presente el fusil y además aumentar la confiabilidad del sistema.

El Polígono de Tiro Virtual fue diseñado para ser operado en forma diaria durante los siete días de la semana.

CONCLUSIONES

El diseño del polígono se concentra en que su desarrollo y perfeccionamiento futuro se efectúe de manera escalable en el tiempo, integrando en cada ocasión otras variables en su progreso natural de mejoramiento de sus partes y componentes. El hecho de haber construido el sistema en forma modular, trae aparejado la ventaja de conectar y desconectar rápidamente sus componentes sin disminuir los tiempos muertos entre fallas. La construcción modular permite intervenir cada uno de sus componentes sin restarle funcionalidad al sistema como tal.

Cabe demostrar con este proyecto que cualquier reto tecnológico al que se vea enfrentada la ingeniería y/o industria militar, es factible de afrontar con éxito, producto de que las capacidades individuales de sus ingenieros y técnicos que residen en sus organizaciones, están siempre disponibles para satisfacer tales requerimientos.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Caffrey, Matthew. 2000. "History of Wargames: Toward a History Based Doctrine for Wargaming". 2000.
- [2] Exposición "Oportunidades de desarrollo tecnológico del sector de la Defensa Nacional". CORFO, Vicepresidente Ejecutivo de. 2015. Santiago: s.n., 2015.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

UNA MIRADA AL PASADO DE LA CARTOGRAFÍA DE CHILE



UNA MIRADA AL PASADO DE LA CARTOGRAFÍA DE CHILE

MAY. Pedro Castillo Figueroa¹

Resumen: *En el contexto de la historia de la cartografía, este artículo expone brevemente una mirada de la evolución que ha sufrido la cartografía desde los inicios de la prehistoria, con una mirada holística en su evolución a nivel universal y poniendo énfasis en la cartografía de Chile durante los siglos XVI hasta el siglo XIX. La cartografía como elemento base para la toma de decisiones en un ámbito geográfico, ha demostrado ser una herramienta vital como generadora de escenarios, con su particularidad de entregar información, lo que en la actualidad tiene una aplicación para diferentes usos. Es por esta razón, que damos esta mirada de la cartografía, con la finalidad de poder aquilatar intuitivamente su transcendencia y su importancia en hechos que hoy son partes de hitos en la historia universal y en la historia de Chile. Finalmente, el esfuerzo principal de este artículo se centra en el desarrollo de una descripción de la cartografía de Chile desde sus comienzos, con énfasis en sus principales cartas, mapas y realzando a sus creadores e impulsores, lo que se manifiesta en un constante cambio debido a nuevos descubrimientos y el avance implacable del conocimiento y de la tecnología.*

Palabra claves: *Cartografía, Historia, Tecnología*

Abstract: *In the context of the history of cartography, this article briefly presents a view of evolution that has been mapping since the beginning of prehistory, with a look of holistic in its evolution at the Universal level and with emphasis on cartography of Chile during the 16th until the 19th century. The Mapping element base for decision-making within a geographical area has proven to be a vital tool as a generator of scenarios, with its particularity of delivering information, which currently has an application for different uses. It is for this reason; we give you this look of cartography, in order to be able to intuitively refine its transcendence and its importance in facts that are now parts of milestones in Universal history and in the history of Chile. Finally, the main effort of this article focuses on the development of a description of the mapping*

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas, mención Geografía.



of Chile since its inception, with emphasis on its main charts, maps and enhancing their creators and promoters, which manifests itself in a constant change due to new discoveries and the relentless progress of knowledge and technology.

Key words: *Mapping, History, Technology*

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos el hombre realizó mapas para desplazarse, la caza y la navegación, los primeros mapas prehistóricos fueron encontrados en cuevas, paredes rocosas, maderas, cueros y otros (25.000 años atrás); siendo los primeros mapas no petroglíficos, los encontrados en tablas de arcilla elaborados por los Babilonios. (Ver figura N° 1).

Al sur de Babilonia, en el siglo III A.C., fue encontrado el primer vestigio de la cartografía, siendo este una tabla de barro cocido, de 12 cm de altura, la que representaba un plano urbano.



Figura N° 1: Tabla de arcilla de Babilonia[1].

La cultura egipcia utilizó el papiro para la confección de planos urbanos, y fue el pueblo fenicio quienes se encargaron de la cartografía marítima representando fielmente las rutas marinas desde el siglo VI al I A.C. (Ver figura N° 2).

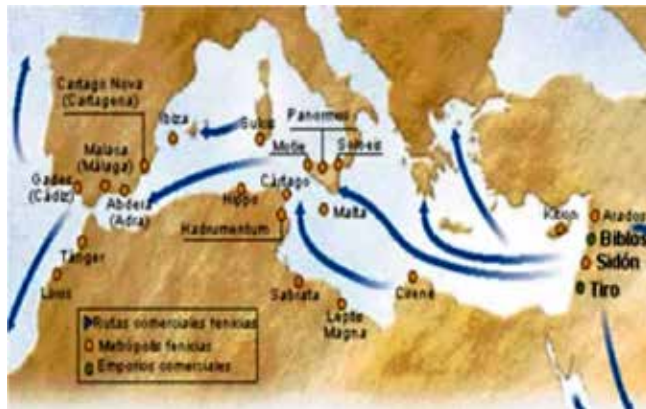


Figura N° 2: Rutas marítimas de los Fenicios[2].

La cultura griega fue el bastión creador de la cartografía matemática, desde el siglo VII A.C hasta el siglo XV D.C, entregando argumentos y fundamentos para definir a la Tierra como esférica, esto según Aristóteles.

En el siglo II A.C., el matemático y astrónomo Eratóstenes de Mileto, logró calcular el diámetro de la Tierra, obteniendo un error mínimo, sin embargo, en el siglo I A.C., Posidonio de Rodas disminuyó el tamaño del meridiano medido por Eratóstenes de 39.500 km a 28.400 km, lo que generó el concepto de una Tierra más pequeña. (Ver figura N° 3).



Figura N° 3: Eratóstenes de Mileto y cálculo del perímetro de la Tierra[3].

La medición de Eratóstenes, consideró el 21 de junio el solsticio de verano en Siena (Asuán). Al mismo tiempo, en Alejandría había una desviación vertical de $7,2^\circ$, Eratóstenes estimó que entre ambos lugares había 5.000 stadium, es decir unos 800 km.



Luego $360^\circ/7,2^\circ = 50 \times 800 \text{ km} = 40.000 \text{ km}$

Si comparamos el cálculo anterior con la circunferencia terrestre ($2 \times \pi \times r_{\text{Tierra}} = 2 \times 3,141592 \times 6.378,1 = 40.075 \text{ km}$), hay una diferencia de 75 km.

Ptolomeo denominado el Padre de la Cartografía, en el siglo I D.C., elaboró un mapa del mundo con dimensiones casi exactas, el cual fue utilizado hasta la Edad Media y sólo fue corregido en 1595 por Mercator.

La Edad Media, con su noción “Teocentrista”, sustituye los aportes de Ptolomeo por el concepto bíblico de la tierra plana con Jerusalén en el centro, adoptando el modelo de Orbis Terrarum (disco de la tierra), que se denominó mapa de “T en O” (siglo IV hasta casi el siglo XV, ver figura N° 4).



Figura N° 4: “Mapa en T en O”[4].

Este tipo de mapas mostraba una tierra plana, dividida en tres partes por cursos de agua en forma de T, todo rodeado por un océano circular.

En el siglo XIV, como los mapas medievales europeos habían olvidado los conceptos y aportes entregados por los griegos, los navegantes europeos utilizaban para guiarse en sus viajes las anotaciones de los capitanes de barcos que realizaban de puerto a puerto, recibiendo estas colecciones de notas el nombre de “Portulanos”, los cuales alcanzaron mayor precisión con la incorporación de la brújula.

Al traspasarse los puntos descritos a papel y unirse a puntos de otros libros se crean las primeras cartas náutica o “Cartas Portulanas”. (Ver figura N° 5).



Figura N° 5: Carta Portulanas[5].

La cartografía de la Edad Moderna, a mediados del siglo XV, renace el concepto de la esfericidad de la tierra, generándose una nueva concepción cartográfica, provocando la revisión de los planos existentes y la creación de nuevas cartas y mapas de toda Europa.

En el siglo XVI, como consecuencia del descubrimiento de América y numerosas expediciones realizadas por países colonialistas como España, Portugal, Inglaterra, Holanda y Francia entre otros, las tierras conocidas aumentan debiendo los cartógrafos comenzar a actualizar la cartografía de la época y aplicar nuevas proyecciones para esta tierra más amplia. Con la aparición de la imprenta en el siglo XV, los precios de mapas y planos disminuyeron.

El Mapamundi de Abraham Ortelius es de las primeras representaciones cartográficas más reales. (Ver figura N° 6).



Figura N° 6: Mapamundi de Abraham Ortelius[6].



Los avances de estudios de astronomía, geometría y el revuelo de los descubrimientos crean un nuevo concepto de la cartografía, que lleva a concebir nuevas proyecciones cartográficas, siendo la de Mercator y la de Ortelius las más conocidas e importantes.

Mercator en 1565 crea una proyección cartográfica que lleva su nombre en la actualidad, la cual disminuye la longitud del mar Mediterráneo a 53° y posee las dimensiones del mundo, corrigiendo los errores de la cartografía ptolomeica. Esta proyección es utilizada para las cartas náuticas hasta el día de hoy.

Por otro lado, Ortelius crea una proyección que consiste en un mapamundi de dos círculos, dividido por paralelos rectos y meridianos curvos, representando al viejo y nuevo mundo. Dando inicio a la cartografía contemporánea. (Ver figura N° 7).



Figura N° 7: Mapamundi de Ortelius y su proyección[7].

Así la cartografía, durante el tiempo, fue evolucionando permanentemente gracias a la tecnología, conjunto de conocimientos ordenados en forma científica, que avanza a pasos agigantados y como consecuencia de esto, es lo que hoy se conoce como ciencia de la cartografía.

En 1949 la ONU definió, que la cartografía es “la ciencia de elaborar todo tipo de mapas”. Por su parte, The International Cartographic Association - ICA, la define como “el conjunto de estudios y operaciones científicas y técnicas que interviene en la formación o análisis de los mapas, modelos en relieve y globos, que representen la Tierra o parte de ella, o cualquier parte del Universo”[8].

La cartografía como elemento base, tiene como objetivo reunir y analizar los datos, representar los antecedentes gráficamente a diferentes escalas, incorporar regiones de la tierra y finalmente, entregar o transmitir en forma eficiente la información y que esta sea verificable.



CARTOGRAFÍA EN CHILE SIGLO XVI[9]

Por orden del rey de España se dictaba la ejecución de expediciones, terrestres o marítimas, en las cuales se realizaba el trazado del terreno de los territorios descubiertos o conquistados. Estas cartas constituían una guía para el viaje de regreso de los expedicionarios.

La primera expedición que llega al extremo austral de Chile, es la de Hernando de Magallanes. Acompañado por el cartógrafo Juan Pigafetta se bosqueja la Antártida, recibiendo esta carta el nombre de “Destroic Patagonique” (1520).

Otro miembro de la expedición era Diego Rivero, quien a su vuelta a Sevilla confeccionó la primera carta del Estrecho de Magallanes (Ver figura N° 8), además un mapa del Mundo, donde por primera vez aparecen los polos, y el lugar preciso de América dentro del globo terráqueo.



Figura N° 8: Primera carta del Estrecho de Magallanes[10].

Dentro de la expedición de Diego de Almagro, se encontraba el sacerdote Cristóbal de Molina, el cual en 1535 realizó una de las cartas de mayor extensión del territorio del siglo XVI. De esta carta no se tiene registro alguno, supuestamente por su extravío. El Fray Diego de Ocaña confeccionó a fines de siglo una carta que involucraba todo el territorio desde Coquimbo hasta el norte de la isla de Chiloé, señalando toda la ocupación española en las tierras chilenas. (Ver figura N° 9).



Figura N° 9: “Bosquejo de la costa de Chile del Fray Diego de Ocaña[11]”.

A finales de este siglo, corsarios ingleses, como Sir Francis Drake, y comerciantes holandeses realizan numerosas expediciones a América, generando un alto interés en Europa por estas tierras tan fértiles y rica en recursos naturales. La cartografía de este siglo estaba confeccionada en pergaminos, con un trazado muy básico, sin ninguna precisión y con mucha fantasía.

CARTOGRAFÍA EN CHILE SIGLO XVII[12]

A principios de siglo, la cartografía es en colores y contiene topónimos (nombre geográfico). Hacia la mitad del siglo, se poseía una noción de más de la mitad del territorio de Chile, gracias a las gestiones del sacerdote jesuita Alonso de Ovalle, el cual elaboró la “Tavula Geographica Regni Chile”, mapa incorporado a su obra “Histórica Relación del Pueblo de Chile”, la cual fue publicada en 1646, en Roma. (Ver figura N° 10).



Figura N° 10: Távula Geographica Regni Chile[13].



Hasta el siglo XVI, las jurisdicciones del territorio de Chile no estaban claras, y toda la cartografía confeccionada hasta entonces, señalaba como límite sur la isla de Chiloé, lo que trajo consigo el problema que la Corona española no podía ejercer jurisprudencia sobre las tierras magallánicas, quedando denominadas como “Provincias del Estrecho”, permaneciendo dividida América en dos. Este error fue traspasado a obras de origen europeo, como el “Novus Orbis” del holandés Juan de Laet (1625), el cual confecciona un mapa, que por primera vez incluye la isla de Juan Fernández y la isla de Chiloé con su forma real. (Ver figura N° 11).



Figura N° 11: Novus Orbis del siglo 18 y 19[14].

Este mismo problema se aprecia en el mapa del cartógrafo francés Nicolás Sanson d’Abbeville, quien publicó en París en 1656 un mapa de América Meridional, en el cual aparece “Terre Magallanique” como una entidad separada de Chile y Argentina, entonces denominada como Virreinato de la Plata. (Ver figura N° 12).



Figura N° 12: Terre Magallanique[15].



Laet y Sanson d'Abbeville tuvieron un motivo para crear este tipo de cartografía, ese motivo era mostrar tierras no ocupadas para ser explotadas por sus coronas, por lo que los mapas del siglo XVI adoptaron una intención geopolítica.

Sólo a fines de este siglo, el cartógrafo francés Guillermo Delisle elabora el mapa titulado "L'Amerique meridionale dresse sur les observations de Mrs. de l'academie royal des sciences et quelques autres, et sur les memories le plus recens", en el cual las tierras magallánicas están comprendidas en un solo nombre, el cual era Chile. (Ver figura N° 13).



Figura N° 13: "Mapa de Guillermo Delisle[16]".

CARTOGRAFÍA EN CHILE SIGLO XVIII[17]

En este siglo, la cartografía de América se encontraba más atrasada que la europea, debido al difícil acceso hacia el interior del continente, a causa de las hostilidades del pueblo Mapuche y las diversas características geográficas americanas. Por esta razón, los mapas del nuevo continente se limitaban sólo al trazado de las costas.

Las costas occidentales fueron dibujadas hacia finales del siglo XVIII, entre 1786 y 1796, los navegantes Alejandro Malaespina y José Bustamante siguieron la ruta de Hernando de Magallanes recorriendo desde el estrecho de Magallanes hasta California. (Ver figura N° 14).



Figura N° 14: Ruta de Alejandro Malaespina y José Bustamante.

A mediados de siglo comienza a despertar el interés científico de muchos gobernadores, como por ejemplo de Ambrosio O'Higgins, quien encarga a Juan Egaña y León Garabito (Ver figura N° 15), directores de la Academia de San Luis y de la Universidad de San Felipe (actual Universidad de Chile), que realicen estudios geográficos de Chile. A Garabito se le encargo, en el año 1757, que confeccionara la "Carta Geográfica de Chile", para ser enviada al rey Felipe VII, la cual fue difundida en Chile con el seudónimo de "Poncho Chileno".



Figura N° 15: Juan Egaña y León Garabito[18].

En 1776, Alonso de Ercilla y Zúñiga en su obra "La Araucana" publica un mapa de Tomás López, titulado "Mapa de una parte de Chile", que comprende el terreno donde



pasaron los famosos hechos entre españoles y araucanos, basado en el “Poncho Chileno”. (Ver figura N° 16).



Figura N° 16: Mapa de una parte de Chile de Tomás López[19].

Durante este siglo se efectuaron numerosas expediciones hacia el sur del continente, especialmente hacia el estrecho de Magallanes, el cual constituía un punto estratégico y comercial, lo que provocó la necesidad de crear cartografía de calidad, contando con apoyo de la Corona española.

Entre 1793 y 1795, se encomendó a José de Moraleda, piloto de la expedición de Malaespina, la misión de crear los mapas de la zona de los canales, destacándose el vasto aporte que dio a la producción de la cartografía de la época. (Ver figura N° 17).



Figura N° 17: Cartografía con los canales del sur[20].



CARTOGRAFÍA EN CHILE SIGLO XIX[21]

Hasta el siglo XVIII, la cartografía chilena poseía una base de expediciones españolas y británicas, además no contenía datos de altitud, lo que le restaba valor científico. Es por esta razón que se contrata al hidrógrafo británico Robert Fitz-Roy, (Ver figura N° 18) para que efectúe el levantamiento de la cartografía de las costas chilenas, desde el buque “Su Majestad Británica Beagle”, en el año 1835.

Muchas de estas cartas fueron encomendadas por el Ministerio de Guerra y Marina, y publicadas en 1843, las cuales han servido como base para el litigio fronterizo entre Chile y Argentina, específicamente en la zona del canal Beagle.



Figura N° 18: Robert Fitz-Roy[22].

El Gobierno de Chile, al notar la falencia en los trabajos de cartografía de costas, decide crear en 1879 la “Oficina Hidrográfica”, dependiente del Ministerio de Economía, actual Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Su misión era generar la cartografía y distribuirla entre la Armada y las Oficinas Marítimas. Una de sus grandes publicaciones, que hasta hoy es actualizada es el “Anuario Hidrográfico de la Armada”.

En la década del treinta, Claudio Gay presenta un proyecto a Diego Portales, en el cual se realizaría un catastro del territorio, trayendo como resultado una cartografía de 28 x 36 cm de la parte sur de Chile, la cual adjunta a su obra “Atlas de la Historia Física y Política de Chile”. (Ver figura N° 19).



Figura N° 19: "Atlas de la historia física y política de Chile[23]".

En 1848, el geólogo italiano Amado Pissis realiza trabajos de triangulaciones y observaciones astronómicas, teniendo como resultado el "Plano del país", el cual se componía por trece hojas a una escala 1:250.000, que comprendía a Chile desde su límite norte hasta el paralelo 42° de latitud sur. Sólo hasta el paralelo 38°, las medidas cartográficas y geodésicas poseen exactitud, puesto que, hacia el sur, la vegetación y los conflictos con los araucanos, sólo permitieron obtener coordenadas por medio de observaciones astronómicas.

La cartografía urbana estaba a cargo de los talleres de Cartografía de la Dirección General de Obras Públicas, actual MOP, lo mismo que la cartografía de las zonas salitreras en el norte del país.

El Presidente de Chile, don Jorge Montt, en 1891 creó la "Oficina Geográfica", dependiente del Estado Mayor General del Ejército, la cual constituyó la base de la creación del Instituto Geográfico Militar (29 de agosto de 1922, según el Decreto Supremo 2.090).

CONCLUSIONES

Desde sus inicios la cartografía se ha aplicado en diferentes actividades, lo que ha evidenciado ser un elemento base en la generación de escenarios para la toma de decisiones.

Gracias a la cultura griega le da un fundamento matemático a la cartografía generándola como ciencia.



Por otra parte, el ingenio de astrónomos y matemáticos, permitió desde sus inicios y a lo largo de los años establecer la noción de la tierra, su dimensión y forma real.

La importancia de las primeras expediciones de los navegantes europeos y el uso de la brújula provocó un avance en la generación cartográfica marítima.

En el siglo XVI, las expediciones a Chile generaron gran interés por sus riquezas, la información geográfica obtenida fue traspasada a planos, cartas y mapas, donde se destaca la inclusión de los canales del sur y del Estrecho de Magallanes entre otros.

La cartografía chilena en el siglo XVII tomó un gran realce debido a que la jurisdicción territorial de Chile se pudo delimitar con los accidentes geográficos y acuerdos entre estados de la época.

Al término del XVII la presencia del pueblo Mapuche impidió expediciones de la corona española, lo que se vio afectada en la noción territorial de Chile y por ende en el avance cartográfico.

Ya a inicios del Siglo XVIII, se evidencian los primeros estudios geográficos de Chile, incorporando en forma de accidentes geográficos relevantes a la cartografía la toponimia.

La importancia del Estrecho de Magallanes y los canales del Sur, generó gran interés sobre todo de carácter geopolítico, lo cual permitió la generación de cartografía que en la actualidad se utiliza como antecedente para diferentes litigios.

Finalmente, en el siglo XIX, se da un gran realce al valor científico de la cartografía, lo que provocó la creación de instituciones como la oficina hidrográfica responsable de la cartografía marítima y la oficina geográfica responsable de la base cartográfica nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://oculimundiencalse.blogspot.cl/2010/05/cual-es-el-mapa-mas-antiguo-del-mundo.html>.
- [2] <http://tweb84timwalterespinoza.blogspot.cl/2015/09/civilizacionesfenicia-hebreo-persa.html>.
- [3] <https://www.preceden.com/historiadelageodesia>.
- [4] www.geografia.laguia2000.com/general/mapa-de-t-en-o.



- [5] http://www7.uc.cl/sw_educ/historia/expansion/HTML.
- [6] <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/o/ortelius.html>.
- [7] <http://www.taringa.net/posts/imagenes/3026581/Mapas-Antiguos---Megapost.html>.
- [8] ITC-IGAC. Cartografía. Curso básico de cartografía para tecnólogos. Bogotá, 1988.
- [9] Atlas Cartográfico de Chile.
- [10] <http://valdeperrillos.com/book/export/html/1224>.
- [11] <http://memoriaalterna.blogspot.cl/2010/06/mapadechileocana>.
- [12] Atlas Cartográfico de Chile.
- [13] <http://www.memoriachilena.cl/602/w3article98272.html>.
- [14] <http://www.memoriachilena.cl/602/w329.html#imagenes>.
- [15] <http://www.memoriachilena.cl/602/w3article-3344.html>.
- [16] https://www.raremaps.com/gallery/detail/37064/LAmerique_Meridionale_Dressee_sur_les_Observations.html.
- [17] Atlas Cartográfico de Chile.
- [18] <http://www.Memoriachilena.cl/bibliotecanacional/>
- [19] <https://www.flickr.com/photos/28047774@N04/5927848239>.
- [20] Archivo de la Biblioteca Nacional, Chile.
- [21] Atlas Cartográfico de Chile.
- [22] <http://afton-regis.co.uk/documents/admiral%Fitzroy.htm>
- [23] http://en.m.wikipedia.org/wiki/Diego_Portales

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**REALIDAD AUMENTADA COMO HERRAMIENTA TICS
PARA FACILITAR LA ENSEÑANZA-APRENDIZAJE**



REALIDAD AUMENTADA COMO HERRAMIENTA TICS PARA FACILITAR LA ENSEÑANZA-APRENDIZAJE

CAP. Alberto Villarroel Rivera¹
Sra. Stephanie Golusda Castellón²

Resumen: El presente artículo tiene por objetivo explicar las características y aplicaciones de la realidad aumentada, sus componentes y funcionamiento según sus diferentes niveles. La realidad aumentada es una prometedora tecnología, presente en muchas aulas, que puede ayudar al proceso de enseñanza aprendizaje, ya que complementa la percepción del mundo real, permitiendo al alumno interactuar directamente con los contenidos virtuales, con el fin de afianzar su conocimiento en diferentes áreas. La aplicación de la realidad aumentada y su empleo a través de las distintas interfaces logradas, han sido una herramienta útil para la enseñanza de unidades de aprendizaje de geo-localización, construcción, administración, mecánica, anatomía y asignaturas de nivel escolar básico y medio.

Palabras claves: Educación, Interface, Niveles de realidad aumentada, Realidad aumentada, Realidad virtual, Tecnología.

Abstract: This article aims to explain the features and applications of augmented reality, their components and operation according to their different levels. Augmented reality is a promising technology, present in many classrooms, which can help the process of learning, as it complements the perception and interaction with the real world, allowing students to interact directly with virtual content, in order to strengthen its knowledge in different areas. The application of augmented reality and its use through various interfaces have been achieved useful for teaching learning units geo-location, construction, management, mechanics, anatomy and subjects of primary and secondary school level tool.

Key words: Education, Interface Levels, Augmented reality, Virtual reality, Technology.

1 Alumno del V Curso Regular de Ingeniería Militar de la Academia Politécnica Militar.

2 Profesor de Estado.



1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de las tecnologías de la información y comunicación (TICs) en los procesos de enseñanza han facilitado el aprendizaje por parte de los alumnos de diferentes centros educacionales.

La mayoría de las aplicaciones multimedia, complementan los métodos tradicionales de enseñanza, dado que los contenidos y los objetivos de estudio, se proyectan en un modo muy sugerente e interesante para el estudiante.

Atendiendo al marco específico de la educación, existen distintas razones para la utilización de la realidad aumentada como herramienta tecnológica para la enseñanza de contenidos concretos, ya que refuerza la capacidad de análisis (discernimiento) de los estudiantes, haciéndoles partícipes de un entorno más colaborativo y motivador, por medio de mecanismos visuales.

En los últimos años diversos centros educativos de enseñanza superior han comenzado a explorar los métodos de realidad aumentada como estrategia de enseñanza, con el objeto de enriquecer los actuales programas educativos.

En términos técnicos, la Realidad Aumentada (RA) comprende una diversidad de gráficos por computador, visión artificial y multimedia, de forma que el usuario pueda perfeccionar su percepción del mundo real, mediante la anexión de información virtual. Para que la RA proporcione una visión comprensible del mundo circundante, los escenarios reales y virtuales tienen que ser sincronizados (posicional y contextualmente).

2. REALIDAD AUMENTADA

La realidad aumentada, del inglés Augmented Reality, comprende aquella tecnología capaz de complementar la percepción e interacción con el mundo real, brindando al usuario un escenario en 3 dimensiones con información adicional generada por un computador. De este modo, la realidad física se combina con elementos virtuales, disponiéndose de una realidad mixta en tiempo real.

La RA comprende objetos bidimensionales y tridimensionales que se superponen al mundo real; el efecto suscitado crea la coexistencia de dos mundos, virtual y real, en el mismo espacio.

Sin embargo la RA no debe confundirse con la realidad virtual, pese a las características comunes que comparten, como los modelos 2D y 3D en el campo de visión del usuario,



la principal diferencia es que la RA no reemplaza al mundo real por un mundo virtual, sino que conserva el mundo real que percibe el usuario, completándolo con información virtual superpuesta a la real. El usuario nunca pierde el contacto con el mundo real que le rodea, más bien, puede interactuar con la información virtual intercalada como se muestra en la figura N° 1.



Figura N° 1: Esquema de realidad mixta³.

La arquitectura de cualquier sistema de RA descansa fundamentalmente sobre dos elementos críticos, visualización y seguimiento, pues de ellos depende el grado de inmersión e integración en la realidad mixta. El sistema de seguimiento determina la posición y orientación exacta de los objetos reales y virtuales en el mundo real. El sistema gráfico o visualización, además de generar objetos virtuales, combina todos los elementos de escena reales y virtuales, mostrándolos por pantalla, como se ve en la figura N° 2.

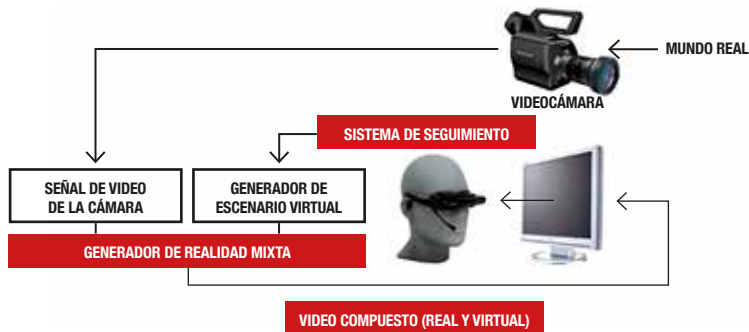


Figura N° 2: Diagrama conceptual de un sistema de realidad aumentada⁴.

La realidad aumentada depende de tres grandes áreas de componentes, los cuales son:

- Interfaces: dispositivo que será utilizado para su empleo, computador, tablet, smartphone o lentes.

3 <http://www.rita.det.uvigo.es/201205/uploads/IEEE-RITA.2012.V7.N2.A9.pdf>

4 <http://www.rita.det.uvigo.es/201205/uploads/IEEE-RITA.2012.V7.N2.A9.pdf>



- Cámara web: este elemento es común para todas las interfaces antes mencionadas y permite capturar las imágenes del entorno en el que se está trabajando.
- Marcas: estas marcas o códigos son imágenes diseñadas y configuradas para que a través de la programación de imágenes 3D, al ser captadas por la cámara web, generen sobre estas imágenes pre-establecidas.

En función a la aplicación de marcas o códigos profundizaremos un poco más, ya que éstas se presentan de diferentes formas, lo que permite alternarlas, rotarlas o clasificarlas conforme a su empleo. Dentro de éstas tenemos:

- Marcas híbridas: Marcas monocromáticas, son fácilmente reconocibles y permiten una variada aplicación, pudiendo ser empleadas en manuales, reglamentos y proyectos de realidad aumentada, como se observa en la figura N° 3.

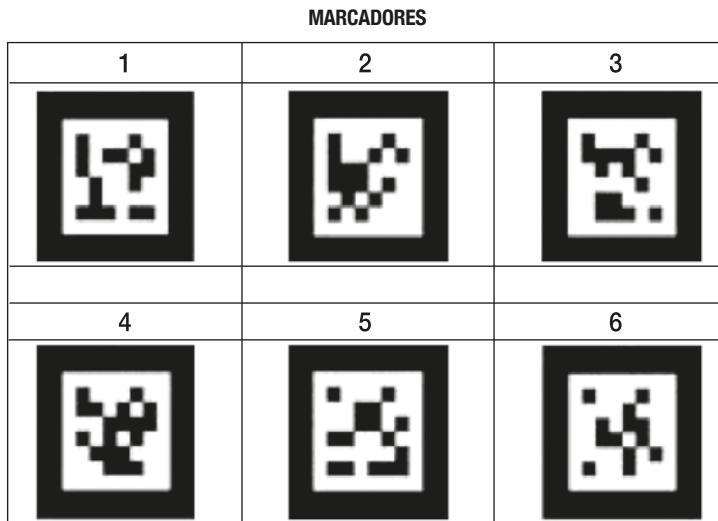


Figura N° 3: Marcas monocromáticas⁵.

- Marcas con imágenes: estas se refieren a imágenes que son asociadas a una imagen en 3D. Lo anterior requiere de mayor trabajo de programación, pero son más estables al presentar un mayor número de puntos de referencia, como se observa en la figura N° 4.

5 <http://www.socialancer.com>



Figura N° 4: Marca realizada con una imagen de crucero⁶.

- Marcas por coordenadas: Se asocia una imagen a una coordenada en particular en el terreno, permitiendo interactuar con ésta al ser observada a través de un interface, para esto es recomendable el uso de lentes de realidad aumentada y algún dispositivo con GPS, que permita identificar su posicionamiento, alertando al dispositivo sobre la generación de la imagen, como se observa en la figura N° 5.



Figura N° 5: RA generada por coordenada. (Elaboración propia).

6 <http://www.pcworld.com.mx/Articulos/31610.htm>



Equipos en los que puede ser observada la realidad aumentada: Si bien algunos de estos equipos permiten la interacción con la realidad aumentada, como fue indicado anteriormente, este punto se basa en la capacidad de observar la realidad aumentada o proyectar ésta en una sala de clases o de reuniones, para lo cual se debe tener:

- Monitor de computador.
- Televisor.
- Proyector.
- Pizarras digitales.
- Tablet.
- Smartphone.
- Lentes para realidad aumentada.

Conforme a lo desarrollado, se evidencia, que de acuerdo a las características de las aulas (las que actualmente cuentan con muchos de estos equipos), no se vislumbra un costo excesivo para la masificación de esta tecnología. No obstante, es importante indicar que antes de su propagación es necesario lograr un acabado y profundo conocimiento de ella, sus alcances y adecuados métodos de empleo. Para finalmente, obtener con ello las máximas prestaciones, beneficios y proyección en el tiempo. Un aspecto importante de la RA lo constituye la interfaz con el usuario. En la mayoría de las aplicaciones, las capas superpuestas sobre la imagen real corresponden a video o sonido. En cualquier caso la RA puede proporcionar un mundo completamente “inmersivo”, característico de la realidad virtual, pero también un mundo físico, en el que los usuarios disponen de cierta capacidad para interactuar con el medio.

La RA permite generar imágenes virtuales en un entorno real, favoreciendo a los alumnos y profesores en su interacción. Además de lo anterior, esto facilita el desarrollo de animaciones, tanto en salas de clases, en laboratorios e incluso en terreno, conforme lo admita los equipos y el desarrollo de ingeniería⁷.

3. NIVELES DE REALIDAD AUMENTADA

Existen cuatro niveles de realidad aumentada desarrollados hasta el momento (del 0 al 3).

⁷ Recuperado de <http://www.rita.det.uvigo.es/201205/uploads/IEEE-RITA.2012.V7.N2.A9.pdf>



3.1 Nivel 0:

Este nivel se denomina hiperenlazando al mundo físico (physical world hyper linking). Está basado en códigos de barra (enlaces 1D, códigos de barra, etc.), códigos 2D (por ejemplo los códigos QR) o reconocimiento de imágenes aleatorias (ver figura N° 6). Lo característico del nivel 0 es que los códigos son enlaces a otros contenidos, en donde no existe registro en 3D ni seguimiento de los marcadores (básicamente funcionan como un hiperenlace html pero sin necesidad de teclear).



Figura N° 6: Código UPC y código QR. (Elaboración propia).

3.2 Nivel 1:

Este nivel se denomina visualización a través de un objeto y está basado en marcadores (marker based). Normalmente es reconocimiento de patrones 2D, el reconocimiento 3D de objetos (por ejemplo, el esqueleto de un dinosaurio). Este tipo de visualización sería la forma más avanzada de nivel 1 de RA (ver figura N° 7). Los marcadores utilizados para la proyección, son unas imágenes en blanco y negro, generalmente cuadradas, con dibujos sencillos y asimétricos”.



Figura N° 7: Ejemplo de modelo 3D asociado a un marcador⁸.

8 Recuperado de <http://www.pitboxmedia.com/tag/eventos-realidad-aumentada/>



3.3 Nivel 2:

Este nivel se denomina visualización sin marcadores (markerless AR). Su funcionamiento es mediante el uso del GPS y la brújula de los dispositivos electrónicos, los que consiguen localizar la situación y la orientación, superponiendo distintos PI (puntos de interés) en las imágenes del mundo real (ver figura N° 8). Este nivel de realidad aumentada también puede incluir el uso de acelerómetros para calcular la inclinación.



Figura N° 8: Ejemplo de RA geoposicionada⁹.

3.4 Nivel 3:

En este nivel se denomina conexión de dos mundos, ya que une el mundo virtual con el real. Es en este nivel, en donde la realidad aumentada, pasa a transformarse en visión aumentada, en la cual el usuario utiliza dispositivos más ligeros (de una escala como las gafas). Una vez que la RA se convierte en VA (visión aumentada), es inmersiva. La experiencia global inmediatamente se convierte en algo más relevante, contextual y personal.



Figura N° 9a: Lentes de realidad aumentada¹⁰.

9 <http://www.dosisgadget.com/lg-optimus-3d-y-la-realidad-aumentada.html>

10 <http://www.fayerware.com>



Muchos autores hablan incluso de un nivel 4 (ver figuras N° 9a y 9b) donde terminaremos usando “displays de lentes de contacto y/o interfaces directos al nervio óptico y al cerebro”. En este punto, múltiples realidades colisionarán, se mezclarán y terminaremos como una Matrix. Se habla de un entorno donde podremos olvidarnos de nuestros cuerpos y que será la culminación de la realidad virtual¹¹.

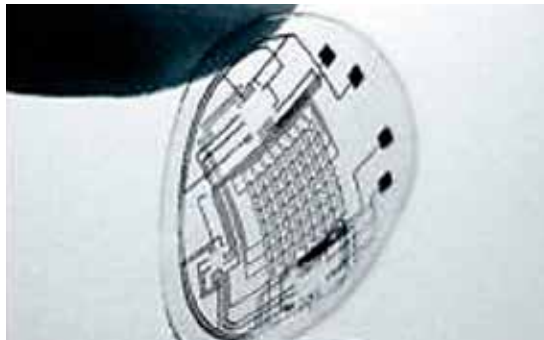


Figura N° 9b: Lentes de alta tecnología para su uso como displays¹².

4. LA RA DENTRO DE LA EDUCACIÓN

Las posibilidades aplicativas de realidad aumentada, respecto a la elaboración de materiales didácticos y actividades de aprendizaje, son múltiples y heterogéneas, en prácticamente todas las asignaturas universitarias, fundamentalmente en las especialidades científico-tecnológicas. Es más, esta tecnología conjuga perfectamente la formación presencial en la educación a distancia. La RA es capaz de proporcionar experiencias de aprendizaje fuera del aula, más contextualizadas, desplegando nexos de unión entre la realidad y una situación de aprendizaje en que participan los estudiantes. Cualquier espacio físico puede transformarse en un escenario académico estimulante. Por ejemplo, los estudiantes de carreras que se relacionan con la geografía o sucesos históricos, podrían disponer de aplicaciones que construyeran emplazamientos excepcionales (mediante mapas y gráficos tridimensionales).

Los libros de texto de realidad aumentada comprenden otra variante interesante. Para visualizar objetos de RA, únicamente se necesita de un software especial de realidad aumentada en el computador, así como enfocar el libro con una cámara web. La finalidad no es otra que completar la información textual o gráfica, con simulaciones de objetos o escenas (ver figura N° 10).

11 <http://www.nubemia.com>

12 <http://www.fayerware.com>

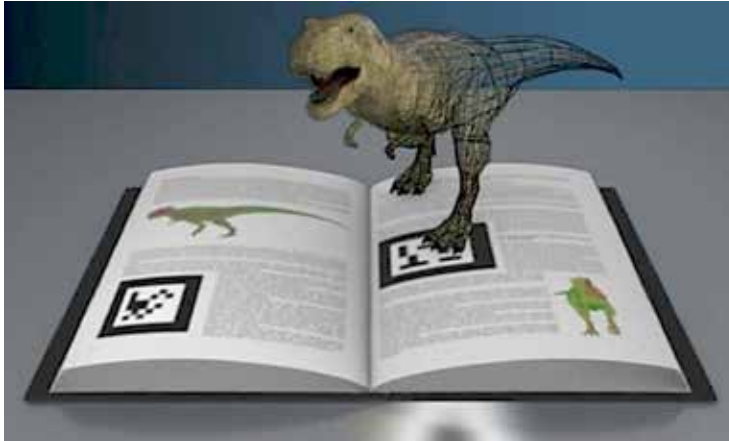


Figura N° 10: Libro de realidad aumentada¹³.

En tanto esta tecnología es obviamente prometedora en cuanto a sus previsibles resultados como bien defienden varios autores (De Pedro & Martínez, 2012; Kato, 2010; Reinoso, 2012), no se puede perder de vista la siempre difícil aplicación de las innovaciones al entorno real escolar. Aún reconociendo el enorme potencial de las herramientas que nos proporciona la RA, hay dudas a la hora de implementarlas como herramientas de trabajo en el aula, siendo tal implementación un desafío. El elemento motivacional, tan importante en la educación parece garantizado, pues numerosas han sido las investigaciones que sugieren que la RA refuerza el aprendizaje e incrementa la motivación por aprender. Es de gran importancia escoger bien los objetivos a conseguir con la utilización de estos sistemas y tener en cuenta a qué audiencia nos dirigimos. La realidad aumentada no puede ser la solución ideal para todas las necesidades de las aplicaciones educativas pero es una opción a considera.

Hay que ser prudentes ante el cambio revolucionario prometido por las tecnologías y hay que mantener un cierto grado de escepticismo. En esta línea, también sería una cuestión a discutir, si estas nuevas innovaciones tecnológicas producen a su vez novedades en la forma de enseñar, lo que se denominan pedagogías emergentes. Las pedagogías emergentes son: “Un conjunto de enfoques e ideas pedagógicas, que surgen alrededor del uso de las TICs en educación y que intentan aprovechar todo su potencial comunicativo, informacional, colaborativo, interactivo, creativo e innovador en el marco de una nueva cultura del aprendizaje”. Cuestión a discutir es si una innovación pedagógica es completamente necesaria hablando de las tecnologías de realidad virtual.

13 <http://laimprentaconline.com/blog/wp-content/uploads/2012/12/realidad-aumentada-21.jpg>



Estas tecnologías pueden ofrecer ventajas incluso integrándose en métodos de enseñanza tradicional. Las tecnologías en dispositivos móviles superan la limitación del tiempo y del espacio en los entornos de aprendizaje. Las aplicaciones de RA, no solo responden a este tipo de exigencia, si no que la amplían de manera cualitativamente significativa, al ofrecer información situada, contextualizada, desde el lugar y en el momento que el alumno o usuario la precisa.

La RA crea el soporte para una fluida interacción entre el entorno real y el virtual. El uso de la metáfora de la interfaz tangible para la manipulación de objetos. La habilidad para hacer suavemente la transición entre realidad y virtualidad. En esta misma línea, existen tres razones para apostar por la RA: "Posibilita contenidos didácticos que son inviábiles de otro modo. Nos ayuda a que exista una continuidad en el hogar. Aporta interactividad, juego, experimentación, colaboración, etc."

Los enfoques metodológicos actuales consideran adecuado aplicar a los entornos de realidad virtual, tales argumentos pueden ser igualmente compatibles con los sistemas de RA. De hecho se reconocen dificultades, debido a su elevado costo, de implementaciones de realidad virtual (RV) que sirvan a los objetivos educativos y que por tanto estarían en principio restringidos a museos o instituciones de investigación, pero que esta limitación se verá superada (como de hecho ya lo está siendo) por los avances que desde la fecha del artículo se han producido en los entornos tecnológicos y redes de acceso.

El constructivismo se adopta como base para el desarrollo de entornos altamente interactivos y participativos, donde el usuario es capaz de modificar, construir, probar ideas, e involucrarse activamente en la resolución de un problema. Roussou M (2004)¹⁴ afirma que hay un gran consenso entre los educadores sobre que la interactividad en la enseñanza es necesaria y sigue el argumento de G.R. Amthor de que "la gente retiene el 75% de lo que ve, oye y hace".

Desde este punto de vista parece claro que la tecnología de RA ayudará al proceso de aprendizaje de los alumnos debido entre otras razones al alto grado de interacción que proporciona.

Esta forma de enseñanza es conocida como enfoque "aprender haciendo" (*learning through activity* o *learning by doing*) también conocido como aprendizaje activo (basado en actividades, proyectos, etc.) y "aprender jugando" (*learning through play*), lo cual es compatible con el punto de vista constructivista¹⁵.

14 ROUSSOU, M (2004). Realidad aumentada como estrategia pedagógica. Barcelona: Ediciones Altaya.

15 <http://www.rita.det.uvigo.es/201205/uploads/IEEE-RITA.2012.V7.N2.A9.pdf>

5. LA REALIDAD AUMENTADA EN EL ENTRENAMIENTO MILITAR

Una empresa de Chicago llamada “Tanagram Partners” cambió la manera en que se conoce el combate militar desde el año 2012, gracias a su tecnología de realidad aumentada aplicada en los cascos de tropas estadounidenses para ayudar en situaciones hostiles (ver figuras N° 11 y 12).

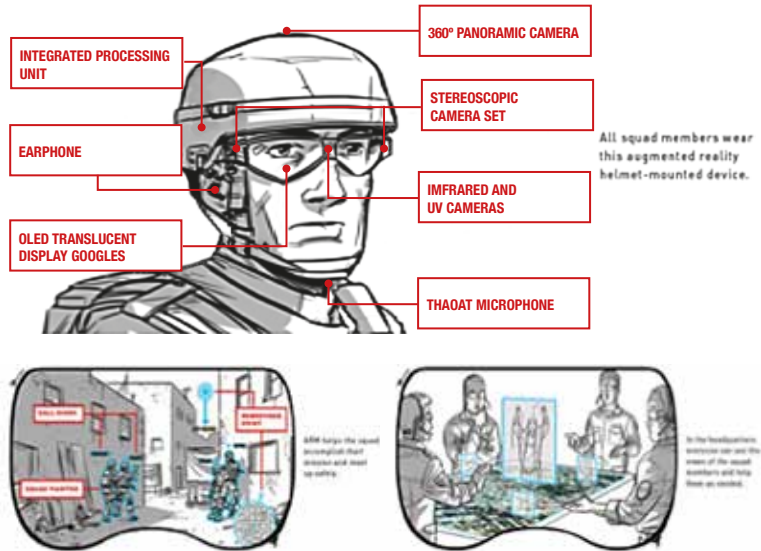


Figura N° 11. Prototipo de Tanagram Partners¹⁶.

Las imágenes del prototipo muestran un sistema de sensores y pantallas que recogen y proporcionan datos a cada soldado en el campo. Esto incluye una computadora, una cámara de 360 grados, sensores infrarrojos, cámaras estereoscópicas y gafas con pantallas OLED transparentes. Con esta tecnología integrada en un casco, los soldados serán capaces de comunicarse a un servidor de operaciones que recoge y envía información 3D para mostrarse en las gafas en tiempo real.

Desde un punto de vista técnico, la visualización con Realidad Aumentada cada vez va a estar más presente en el campo de batalla. Las imágenes vistas en películas de ciencia ficción en las que los combatientes pueden ver imágenes del entorno superpuestas a la visión normal, con información sobre la situación de los compañeros y de los enemigos, van camino de hacerse realidad.

16 <http://www.ticbeat.com>



El Naval Research Laboratory de la US Navy en su centro de realidad virtual está trabajando en varios proyectos entre los que destacan el sistema Dragón de visualización del campo de batalla y el Battlefield Augmented Reality System (BARS o sistema de realidad aumentada para el campo de batalla).

Saber cuál es la geografía circundante y donde están los efectivos propios y los del enemigo han sido y son aspectos claves de la táctica militar. El sistema Dragón sustituye el cajón de arena donde se simula el campo de batalla por su equivalente virtual en 3D. BARS es un sistema portátil (wearable computing) que proporciona información superpuesta a la visión normal sobre los edificios circundantes, sus funciones, su estructura, los combatientes detectados, amigo, enemigos y otra información relevante en el campo de batalla urbano.

Los BARS estarían desarrollados con un sistema colaborativo de Realidad Aumentada móvil. Cada miembro del equipo tendrá un SMRA con un visualizador y un sistema de posicionamiento. En el visualizador se mostrará la información relativa al campo de batalla en tiempo real y superpuesta a este. La información se modificará dinámicamente en función de la posición y de la orientación de la persona.

Este sistema tendría también la capacidad de intercambiar información entre los miembros del equipo, esta información podrá ser tanto visual como sonora.



Figura Nº 12: Casco de combate, con tecnología de realidad aumentada¹⁷.

17 <http://stocarnas.com>



La información mostrada puede variar entre el seguimiento activo de objetivos, detección de enemigos hostiles o la localización de puntos clave, además de proporcionar a la base una imagen de video en tiempo real de lo que hace el soldado. Como puntos extra es capaz de recibir las imágenes aéreas de drones espía en la zona y de mostrar sobre el terreno las zonas seguras e inseguras con diferentes colores.¹⁸

6. EJEMPLO DE APLICACIONES DESARROLLADAS EN LA ACAPOMIL.

La Academia Politécnica Militar, buscando fomentar y potenciar la innovación y la creatividad, se encuentra apoyando proyectos a través del Departamento de Investigación y Desarrollo, lo que permitió que esta idea participara en la base de selección de proyectos de investigación y desarrollo del SIDE (Sistema de Investigación y Desarrollo del Ejército). El objetivo de esto es alcanzar un nivel de conocimiento elevado en esta materia, buscando un adelanto tecnológico que se ocupe de la obtención de conocimiento y capacidades, cuya meta sea la solución de problemas prácticos con ayuda de la tecnología, mejorando de manera sustancial los procesos.

Con el objetivo de validar en algunas áreas e identificar su real uso, se desarrollaron ejemplos de aplicaciones dentro de los cuales destacan los siguientes:

Un terreno levantado en 3D que permita identificar morfología y favorecer trabajos de topografía tanto en docencia como en entrenamiento, además de esto nos permite integrar unidades e imágenes geomorfológicas, todo lo anterior bajo la premisa que esta imagen puede ser estática o animada, como lo muestra la figura N° 13.

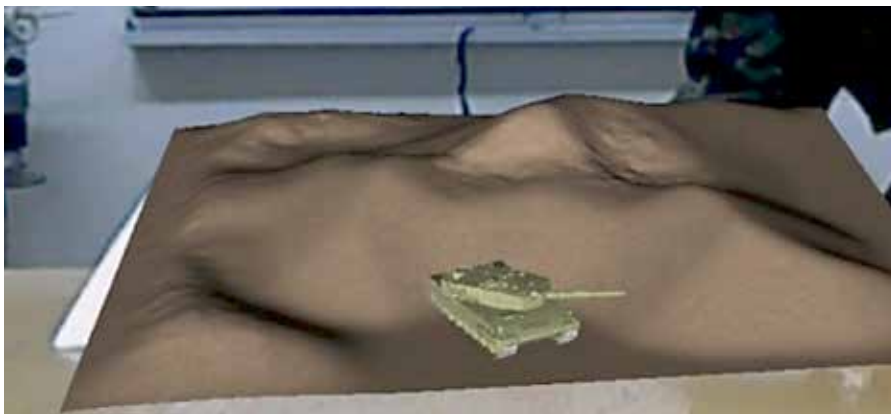


Figura N° 13: Terreno con vehículos en movimiento. (Elaboración propia).

18 <http://www.ticbeat.com>



Imágenes integradas a presentaciones o clases, esto requiere de la adquisición de lentes de realidad aumentada, los que permitirán una mayor interacción y facilitará la inclusión de imágenes, permitiendo una mejor comprensión de los alumnos, esto a su vez podría utilizarse para variadas materias, un ejemplo concreto es el que se muestra en la figura N° 14.



Figura N° 14: Avión como parte de una clase de tecnología militar. (Elaboración propia).

La incorporación de esta tecnología si bien presenta un desafío, permitirá la mejoras sustanciales en manuales técnicos y reglamentación, además de que su utilización solo requiere de computadores de características regulares y una cámara web, el software que permite su utilización puede ser difundido a través de intranet o de un CD incorporados a los reglamentos, un ejemplo de esto está demostrado en la figura N° 15.

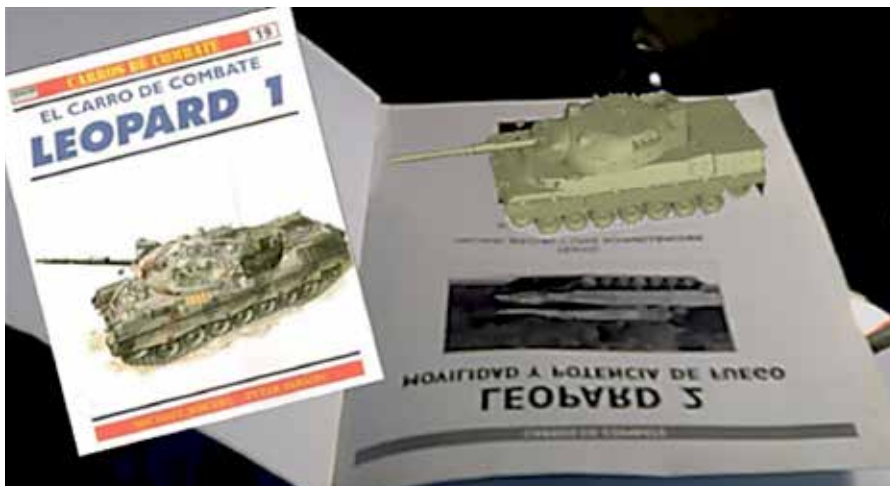


Figura N° 15: Configuración de imágenes a textos. (Elaboración propia).



7. EMPLEO DE APLICACIONES EN DISPOSITIVOS MÓVILES

Es importante considerar que la flexibilidad de esta tecnología no está solamente supeditada al empleo de computadores, también es posible su uso en dispositivos móviles, esto nos permite una mayor flexibilidad para su empleo, incluso fuera de la sala de clases, permitiéndonos ver imágenes con realidad aumentada en ambientes abiertos, tales como: compartimentos, laboratorios, gabinetes, etc.

Esto requiere de programación un poco más avanzada, además de la generación de aplicaciones compatibles para dispositivos móviles, permitiendo observar imágenes de realidad aumentada como la presentada en la figura N° 16.



Figura N° 16: Ejemplo del uso de smartphone. (Elaboración propia).

Considerando la similitud en lo referido a aplicaciones estas podrían ser extrapoladas a los tablet, utilizando la misma aplicación y mejorando evidentemente la calidad de imagen, esto facilitaría su empleo en laboratorios y terreno, permitiendo observar los componentes interiores de vehículos blindados y su funcionamiento sin la necesidad de abrir los compartimentos como lo indica la figura N° 17.



Figura N° 17: Ejemplo de uso de iPad. (Elaboración propia).



8. APLICACIONES PARA EL USO DE LENTES PARA REALIDAD AUMENTADA

Este tipo de hardware es una mejora sustancialmente positiva en la investigación, ya que con la adquisición de lentes para realidad aumentada, se logrará evitar el uso de interfaces que dificultan la observación de las imágenes, como es el caso de computadores o dispositivos móviles, evitando el empleo de equipos portátiles o ligados a un escritorio. Esta tecnología abrirá un mundo de posibles desarrollos en los que se podrá engañar a los sentidos presentando información de imágenes virtuales en terreno, animaciones, vehículos y un sin número de elementos dentro del mundo real, llevando a un nuevo nivel de inmersión a los usuarios. Así se puede interactuar con esta tecnología de manera muy natural y mejorar el entendimiento de muchos procesos.

Como una manera de ser más concreto en la explicación, se ha seleccionado estos dos ejemplos que muestran de manera más clara su aplicación, estos podrán ser desarrollados en gabinetes, salas de clases y se podrá llegar aún más lejos desarrollando sistemas de simulación en vivo o polígonos en terrenos reales. Algunos lentes de realidad aumentada son presentados en la figura N° 18.



Figura N° 18: Tipos de lentes para realidad aumentada. (Elaboración propia).

Dentro de los ejemplos se puede mostrar un cajón de arena el que será observado por quienes utilicen los lentes conforme lo indica la figura N° 19, es importante destacar que los terrenos podrán ser muy variados, se podrán animar y además incorporarles unidades terrestres, aéreas y marítimas dependiendo de lo programado.



Figura N° 19: Cajón de arena con realidad aumentada. (Elaboración propia).

Otro ejemplo de esto es la incorporación de vehículos blindados para ser utilizados en diversas áreas, a los que se les puede incorporar información o más aún animar un proceso de separación por componentes o ejemplos de su funcionamiento como lo indica la figura N° 20.



Figura N° 20: Componentes de un vehículo. (Elaboración propia).



9. CONCLUSIONES

Como se puede apreciar en el presente artículo, las múltiples opciones de aprendizaje que nos ofrece la realidad aumentada, ha abierto una puerta poco explorada y desarrollada en la educación superior, la cual está llamada a quedarse instalada en nuestras vidas.

Este tipo de tecnologías y en especial la herramienta presentada, contribuye a enriquecer los métodos de enseñanza. Las TICs utilizan la RA, para añadir al entorno real de las personas, nuevas alternativas que enriquezcan los métodos de enseñanza de contenidos educativos.

Ciertamente la RA es un nuevo concepto que se está incorporando en todos los niveles de educación y ha de verificarse su utilidad por medio de la evaluación controlada que examine no solo el rendimiento académico del estudiante, fundamentado en el grado de aceptación de la aplicación, sino aspectos cualitativos de los contenidos académicos, conforme a los currículo impuestos en las diferentes disciplinas. En este sentido las infinitas posibilidades que brinda la RA son latentes, pero la verdadera dificultad reside en lograr incorporar a los contenidos y programas herramientas de uso interactivas que sean manejadas por todos los docentes que imparten educación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ADELL; J. & CASTAÑEDA L. (2012). Tecnologías emergentes. Barcelona: Editorial espiral.
- [2] ROUSSOU, M (2004). Realidad aumentada como estrategia pedagógica. Barcelona: Ediciones Altaya.
- [3] BUSTOS, A. (2005). Estrategias didácticas en la docencia universitaria presencial, Programa de mejoramiento de la calidad y equidad de la educación (MECESUP), Gobierno de Chile.
- [4] DURLACH, N. & MAVOR, A. (1995). Virtual Reality: scientific and technological challenges. Washinton, D.C; National Academy Press.
- [5] HERNANDEZ, J. & PÊNNESI, D. (2012). Tendencias emergentes en educación con TIC. Barcelona: Editorial espiral.
- [6] MANRESA, C & SANSÓ, M. (2011). Realidad virtual y realidad aumentada, interfaces avanzadas. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina.



- [7] La realidad aumentada transformará la tecnología militar. (2010) <http://www.ticbeat.com>
- [8] Portal de realidad aumentada. <http://www.augmented-reality.org/>
- [9] VILLAROEL, A. (2014). Educación Militar 2.0, empleo de la Realidad aumentada en la educación militar. Revista de educación N° 41. Ejército de Chile.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**ANÁLISIS DE NUEVAS TÉCNICAS DE EMPLEO Y
MEJORAMIENTO DEL MATERIAL BLINDADO LEOPARD**



ANÁLISIS DE NUEVAS TÉCNICAS DE EMPLEO Y MEJORAMIENTO DEL MATERIAL BLINDADO LEOPARD

GDB. Roberto Ziegele Kerber.¹

Resumen: Este artículo se elaboró basado en la información recabada producto de visitas a terreno a diferentes unidades del Ejército de Chile, FAMA E y en múltiples reuniones internacionales con países que poseen tanques Leopard en su inventario. Estas reuniones correspondían a la actividad anual que desarrolla el Grupo Desarrollo de Combate de Leoben, oportunidad en que todos los países integrantes, conforme con las nuevas amenazas y lecciones aprendidas, promueven la aplicación de nuevas técnicas en la utilización del material Leopard, se analiza la utilización en el campo batalla actual, las adaptaciones del tanque considerando las últimas experiencias de combate, soluciones a la familia de vehículos Leopard, análisis de consecuencias producto del entrenamiento, informes de estados de situación y las necesidades de países usuarios del tanque Leopard.

Palabras claves: Sistema determinación coordenadas por láser, Sistema principal de combate terrestre, Sistema rodillos para destrucción de minas, Sistema visión día noche conductor

Abstract: This article was prepared based on information collected product field visits to different units of the Chilean Army, FAMA E and in many international meetings with countries with Leopard tanks in its inventory. These meetings corresponded to the annual activity carried Development Combat Group of Leoben, at which all member countries, according to the new threats and lessons learned, promote the application of new techniques in the use of Leopard material, analyzes the current use in the field battle tank adaptations considering the latest combat experiences, solutions to the family of Leopard vehicles, consequence analysis training product, status reports situation and needs of user countries Leopard tank.

Key words: Laser range finder grid reference system, Main Ground Combat System, Mine clearing roller system, Day night vision system driver

¹ Asesor de Metodología de la Doctrina, División Doctrina.



1. INTRODUCCIÓN

En el artículo se dan a conocer algunos de los proyectos de modernización, especialmente de los tanques a nivel mundial pertenecientes a la familia Leopard. Además, se explican proyectos nacionales para vehículos de apoyo y experiencias en las zonas de empleo de las unidades acorazadas, las que en algunos casos derivan en líneas de investigación que pueden ser desarrolladas por organismos expertos institucionales y/o extrainstitucionales.

La información ha sido recabada directamente de los diferentes países que participan activamente en el desarrollo y modernización de vehículos de combate blindados. La baja en los presupuestos de defensa es una constante que afecta a todos estos países, por lo que proyectos de modernización de menor costo atraen la atención, como es el caso de los proyectos desarrollados por Chile y que se detallan en este artículo.

Es interesante como la tendencia mundial a “recuperar” el tanque para el campo de batalla actual, que ha ido, producto de las nuevas amenazas, posesionándose rápidamente en el sitio que siempre tuvo y que es su participación en el combate móvil, guerra de maniobras, y no en el combate asimétrico y/o cercano (urbano) para el que se estaban desarrollando. Países que prescindieron de su material de tanques en los últimos tiempos, dando mayor protagonismo a vehículos blindados a rueda, los han ido recuperando paulatinamente incrementando sus inventarios. Recuperar el material es un tema de recursos, costos, pero más complicado es la pérdida del know how del personal, el que requiere de mayor tiempo y en muchos casos apoyos externos para implementar cursos y/o capacitaciones, situación que actualmente están viviendo varios países europeos.

Existe una gran cantidad de proyectos de modernización y mejoras de los sistemas de armas que están en desarrollo y otros que fueron desarrollados, pero se encuentran a la espera de recursos para materializarlos. Es así que el material de tanques que actualmente se encuentra en servicio en el mundo, ya tiene muchas veces sus sucesores a la espera de iniciar su construcción.

2. DESARROLLO

En general se ha presentado una constante en todos los países, donde la reducción de los presupuestos de defensa ha dificultado los desarrollos de las investigaciones e innovaciones de los sistemas de armas. Al respecto, se considera a Chile como un país con experiencia muy valiosa producto de las condiciones y características únicas de los escenarios en los cuales emplea el material Leopard y vehículos de la familia.



La guerra del Golfo fue el último lugar donde realmente se emplearon unidades de tanques tal como fueron concebidas para el combate. Posteriormente, se utilizaron solo como disuasión y desarrollos orientados a la tendencia del combate en zonas urbanas. A partir de este momento, se empezó a perder la necesidad de contar con tanques y se inició la paulatina reducción de las unidades con la readecuación doctrinaria correspondiente.

En Afganistán no se produjeron conflictos ni enfrentamientos entre unidades blindadas (ver figuras N° 1 y 2).



Figura N° 1



Figura N° 2

El ejército islámico inició su actuar solo con vehículos a rueda, pero en la actualidad ya cuentan con tanques de combate (ver figura N° 3).



Figura N° 3



Ucrania 2014 demostró nuevamente la necesidad de contar con tanques y vehículos blindados en general, tanto en cantidad como calidad (ver figura N° 4).



Figura N° 4

Rusia dio inicio a un importante desarrollo de sus plataformas blindadas. Actualmente, está trabajando en el prototipo del tanque T-14 ARMATA, el cual se prevé esté en condiciones de ser fabricado en serie a partir del año 2020 aproximadamente.

Conforme con los análisis realizados por especialistas en la materia, la presentación pública de este modelo de tanque demuestra que aún no está finalizado el proyecto. En las fotografías se puede observar, principalmente en la torre, las diferencias de desarrollo en el blindaje con respecto al chasis. Se puede inferir que todavía existen componentes que se presentan solo como réplica de lo que será el modelo original (ver figuras N° 5 y 6).

Este prototipo posee muchas similitudes con respecto a los últimos desarrollos tecnológicos realizados por otros países, los que se encuentran en etapa de investigación.



Figura N° 5



Figura N° 6



Además, y como carro de acompañamiento del tanque T-14, se está desarrollando el carro de infantería blindada T-15. Este posee el mismo chasis que el tanque (ver figura N° 7).



Figura N° 7

Koalitsiya – SV obús autopropulsado (ver figura N° 8). Es de características, en lo general y principios de empleo, muy similar a la Panzerhaubitze (PZH) 2000 de origen alemán, el cual permite, efectivamente, acompañar y apoyar a las armas de maniobra para el combate blindado en el campo de batalla.



Figura N° 8: Koalitsiya – SV y PZH 2000 respectivamente.

La caída del muro de Berlín hacía pensar que el tanque quedaría obsoleto, constituyendo un elemento meramente disuasivo, ya que, incluso en conflictos actuales como Afganistán, no se registran combates de consideración que los integren. No obstante lo anterior, la amenaza emergente que representa Rusia con la producción de modernos y potentes sistemas de armas, tales como el MBT T-14 Armata, AIFV T-15 y la pieza ATP Koalitsiya SV, evidencian la necesidad de contar con MBTs capaces de contrarrestar una amenaza regular cada vez mejor equipada y entrenada. Rusia es solo un ejemplo de que este tipo de amenazas sigue vigente, existiendo además



naciones como China y Corea de Norte que inducen un significativo desequilibrio en la balanza.

Muchos países integrantes de la Unión Europea han reducido el número de MBTs y los han dejado en condiciones de almacenamiento extendido. Es así que, incluso algunos países han cometido un error mayor al eliminar las unidades de tanques de su estructura institucional, hecho que en la actualidad están revirtiendo con el apoyo de Alemania, especialmente en la instrucción y entrenamiento de sus tripulaciones. Ante situaciones de este tipo, es importante tener presente que una cosa es enajenar o dejar fuera de servicio el material, el que posteriormente podría ser recuperado a través de adquisiciones de manera relativamente rápida, pero otra muy distinta es la pérdida de las capacidades y conocimiento del personal, el que no se recupera muy fácilmente, por lo que se requerirá apoyo externo.

Además de lo anterior, la doctrina de empleo de los ejércitos, que estaba orientada más al combate cercano (urbano), misiones de paz, etc., ha ido recuperando paulatinamente la necesidad e importancia de contar nuevamente con unidades de tanques. Aquellos países que los habían desechado por completo, hoy se encuentran en proceso de adquisición de este tipo de sistemas de armas. A modo de ejemplo, el ministerio de defensa alemán, decidió aumentar sus unidades de tanques adquiriendo 100 Leopard 2A4, los que serán actualizados a versiones más modernas, principalmente, como Leopard 2A7.

Alemania y Francia, en conjunto, se encuentran desarrollando un nuevo proyecto, el que corresponde a un Sistema Principal de Combate Terrestre (MGCS, Main Ground Combat System), para afrontar los escenarios futuros. Aún no existe gran información sobre este proyecto, especialmente por la metodología de investigación que se está aplicando, en el sentido que aún no se ha definido exactamente qué es lo que se desea desarrollar, sino que debe ser un sistema de armas que permita neutralizar y destruir las nuevas amenazas y aquellas en desarrollo. Este proyecto, en forma muy general, considera los siguientes aspectos:

- Desarrollar un nuevo tanque u otro sistema para el 2035.
- En la 1ra. fase se definirá qué es lo que se necesita, aún no se sabe.
- Debe ser un sistema de combate, no orientado a misiones de paz.
- Debe encuadrarse en los recursos disponibles.
- La metodología aplicada está basada en escenarios y tendencias y el análisis se inicia sin pensar en un sistema preconcebido, solo desde una plataforma básica.
- Se han definido una serie de amenazas de acuerdo con los escenarios y por cada uno se definieron viñetas (posibles situaciones de empleo) y estas se han



ido analizando una a una (matriz de decisión y/o evaluación, con 50 viñetas), considerando además los costos.

- La fase dos es la definición de los conceptos hasta 2017. Se espera definir 2, 3 o 4 conceptos.
- Lo interesante de este proyecto es que no se sabe cuál va a ser el resultado final, no existe una preconcepción de lo que se quiere lograr, esto se definirá producto del análisis que se realice durante la ejecución del proyecto.

Países como Alemania, hasta la entrada en servicio del MGCS², han orientado sus desarrollos principalmente al tanque Leopard 2A7. Entre los años 2020 y 2030 se realizarán upgrades orientados a enfrentar las amenazas de los nuevos sistemas de armas actualmente en desarrollo, para que a partir del 2035, entre en servicio el MGCS.

Los desarrollos están orientados en general a mantener las plataformas actuales y sobre estas incorporar nuevas tecnologías. En el caso de Alemania se presenta la siguiente situación:

- El modelo 2A5 será utilizado solo para instrucción.
- Los modelos 2A6 y 2A7 (ver figura N° 9), han dado excelentes resultados hasta la fecha y permanecerán en servicio al menos hasta el año 2030, realizándose mejoras a sus capacidades para contrarrestar los desarrollos de otros países.



Figura N° 9: Tanque Leopard 2A7.












- El cañón L 55 se mantendrá a pesar que se prepara un programa para su mejora y para la munición.
- Se han instalado cámaras que permiten controlar desde el interior los 360° del tanque, con lo que se ha mejorado notablemente la capacidad de combate con escotillas cerradas.
- Incorporación de sensor meteorológico que transmite la información directamente al computador.

2 Main Ground Combat System.



- El computador balístico tiene una capacidad para ingresarle hasta doce diferentes tipos de munición y permite disparar munición HE a distancias entre 5.000 y 6.000 m.
- Tanto el comandante como el artillero identifican el mismo objetivo con sus respectivos visores.
- La ametralladora de la torre es independiente y se opera a control remoto diurno / nocturno.
- El sistema de aire acondicionado fue mejorado para operar a 50°C e incluso más, permitiendo enfriar tanto el bunker de la munición como toda la óptica.
- Con el aumento de sensores y sistemas de defensa del tanque ha aumentado el consumo de energía, siendo un tema que se encuentra en evaluación.
- Interesante es que las últimas versiones de tanques Leopard han ido aumentando el peso, pero continúan utilizando el mismo motor que el Leopard 2A4 (con pequeñas mejoras), que le da una movilidad excelente a este sistema de armas. Actualmente, se está buscando introducir mayores mejoras a este motor para igualar la movilidad del Leopard 2A4 con el resto de los modelos. El motor es muy confiable y está ampliamente comprobado y uno de los objetivos es mantener esta confiabilidad y es por esto que no se ha cambiado por otros modelos desarrollados como, por ejemplo, el Eurotrip.

2.1 El siguiente cuadro comparativo muestra un resumen donde se indican los principales proyectos que se encuentran en ejecución en los diferentes países.


											
	AUT	CAN	CHI	DEU	DNK	ESP	FIN	NOR	POL	SGP	SWE
1		x		x			x				
2		x		x	x		x				
3				x	x						x
4		x		x	x		x				
5	x	x					x				
6		x	x								
7			x	x							

LEYENDA:

1 Poder de fuego y efectividad.	4 Mando, control, comunicaciones y reconocimiento.
2 Movilidad y maniobrabilidad.	5 Entrenamiento.
3 Protección, supervivencia y resistencia.	6 Mantenimiento.
	7 Vehículos de apoyo



Las continuas actualizaciones y variaciones en el campo de batalla actual y los diferentes sistemas complementarios incorporados al tanque son considerados en el análisis o determinación de las capacidades y limitaciones de estos sistemas de armas, que se analizan sobre la base de tres variables básicas; poder de fuego, protección y movilidad, en las cuales se han incorporado las siguientes actualizaciones:

VARIABLE	PROYECTO
<p>Poder de fuego y efectividad</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La integración de sistemas de control de fuego amplía esta variable más allá del mero conocimiento del calibre y tipos de munición que es capaz de emplear. - El aumento de las capacidades del cañón principal al incorporar una nueva munición 120 mm, digitalización del sistema de armas, torre y mejora del cañón L55 120 mm. Se desarrolló la munición con espoleta de tiempo, IM HE-AB (Air Burst) (ver figura N° 10), la cual tiene tres opciones de empleo: espoleta de impacto, con retardo y de proximidad (puede explotar en el aire). Las opciones se configuran (electrónicamente) en el computador balístico, sin necesidad de manipular la espoleta. <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Figura N° 10: IM HE-AB (Air Burst).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Desarrollo de una estación de armamento para la torre de operación remota. - Reemplazo del sistema de retroceso para el cañón L44. - Actualización de EMES con sistema ATTICA. - Reemplazo del PERI con cámara termal ATTICA. - Actualización del computador balístico para la incorporación de la munición HE. - Incorporación de nueva munición HE y KE de 3a generación, con la finalidad de incrementar el poder de penetración entre un 20 y 30%. - Sistema de guiado eléctrico de armamento secundario.

Movilidad táctica y maniobrabilidad

- Existe equipamiento que permite garantizar la movilidad del tanque más allá de sus inherentes capacidades brindadas por el grupo moto-propulsor y sistema de rodadura; tal es el caso de los (barreminas), sistemas de rodillos para destrucción de minas MCRS (Mine clearing roller system) (ver figura N° 11), palas de remoción de obstáculos (dozer), sistemas de vadeo de cursos de agua, etc.



Figura N° 11: MCRS (Mine clearing roller system).

- Mejoras en el motor, transmisión y sistema de visión del conductor (SPECTUS), para recuperar la movilidad y maniobrabilidad propia del MBT Leopard 2A4, en diversas condiciones climáticas y de visibilidad (MB873 + HSWL354). El aumento de tecnología en los tanques ha significado un aumento proporcional en el peso del vehículo, lo que ha hecho que su movilidad y velocidad se hayan reducido levemente. Sin embargo, se están desarrollando mejoras en los sistemas del tanque para recuperar la movilidad para asimilarla a la del modelo Leopard 2A4.
- Actualmente en todas las modernizaciones del tanque Leopard y otros modelos, la cámara de retroceso para el conductor es una necesidad táctico técnica que no se puede obviar. Los múltiples objetivos; con sus características de movilidad, flexibilidad, alcances, etc., han orientado la conducción táctico técnica del tanque por lograr una mayor independencia de sus tripulantes. Una de estas medidas ha sido la cámara de retroceso del conductor e incluso cámaras que permiten una visión en 360 grados. Con esto se libera al comandante del tanque de dirigir al conductor, solamente le emite la orden de realizar un movimiento, cambio de posición, etc. y este lo realiza utilizando las cámaras, permitiendo a la tripulación de torre concentrarse en batir los objetivos que se encuentran en el campo de batalla.

Protección,
supervivencia y
resistencia

- Nuevos sistemas se han integrado al tanque más allá de nuevos espesores y tipos de blindajes, que permiten la supervivencia del tanque y su tripulación en el campo de batalla. Algunos ejemplos son:
- Sistema de alerta situacional 360° ante amenazas antiblindaje no guiadas. Detecta la amenaza, discrimina el tipo de amenaza e intercepta.
 - Asientos especiales para el conductor para su protección ante minas (ver figura N° 12).
 - Nuevo sistema de aire acondicionado y sistema NBC.
 - Nueva protección adicional ante amenaza RPG.
 - Protección ante minas.
 - Incorporación de una unidad de potencia auxiliar de 17 Kw (APU), trabajo desarrollado por KMW.
 - Protección adicional para la tripulación.
 - Sistema de extinción de incendios en el compartimiento de la tripulación.



Figura N° 12: Asiento conductor.



Mejoras tanque Leopard 2A7.

- Las comunicaciones han evolucionado a modernos sistemas que integran funciones de geolocalización, transmisión de datos, etc., que permiten mantener un panorama operacional común actualizado y en tiempo real, lo que es apoyado por sistemas de reconocimiento de objetivos tales como las cámaras termales o sistemas IFF.



Mando, control, comunicaciones y reconocimiento de objetivos

- Optimización de los sistemas de mando y control.
- Optimizar el rendimiento, operación e interfaces, además de la introducción a las tecnologías de las radiocomunicaciones digitales.
- Implementación de un sensor de espectro y aumento del campo de vista para ampliar las distancias de identificación y enfrentamiento.
- Incorporación de sistema de determinación de coordenadas a través del láser ("laser range finder grid reference system") permite georreferenciar el objetivo al cual se le dispara el láser del tanque. Esto puede ser útil para solicitar apoyo de fuego de forma más rápida en el caso de que logre ser integrado al sistema TORCH.
- Implementación de cámara termal ATTICA para el artillero y el comandante.
- Además, se está incorporando una cámara termal para el conductor.




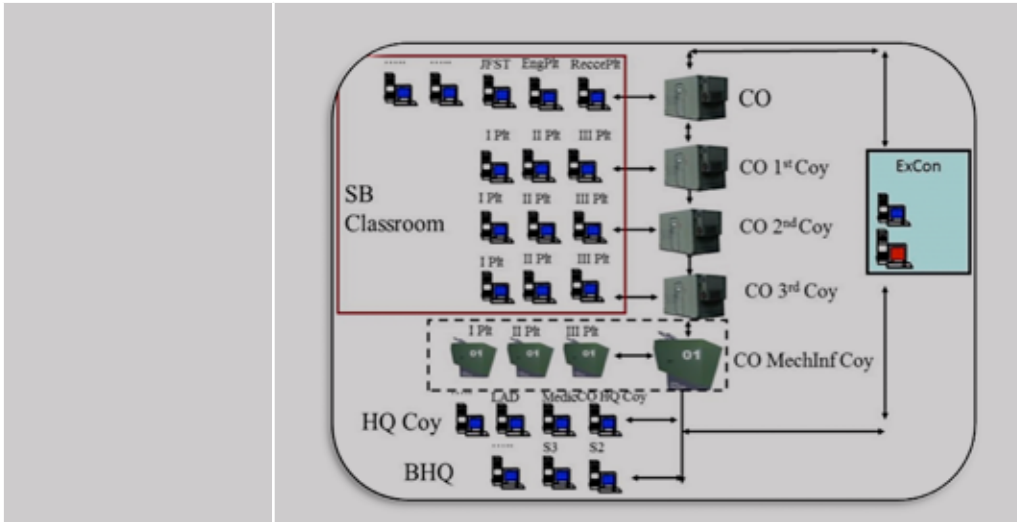
Mejoras tanque Leopard 2A7.

Vehículos de apoyo

- Al ARV 3 MLC 80 se le incorporó el sistema SPECTUS para el conductor, sistemas de comunicaciones digitales e integración de sistemas de recuperación de vehículos en el campo de batalla.
- La modernización del BPz en general ha abarcado:
 - Equipamiento con grúa para 30 T.
 - Adaptación para el transporte de motores Leopard 2A4.
 - Incorporación de un sistema de recuperación en combate.
 - Incrementar el blindaje.
 - Instalación de un sistema antiexplosión en el compartimiento de la tripulación.
 - Modernización del sistema de extinción de incendios.
 - Modernización del winche principal.



	<p>BPz-2 / WZT-BPz 2PL MODERNISATION</p>  <p>Modernización carro recuperador polaco.</p>
Entrenamiento	<ul style="list-style-type: none">- Los batallones de tanques alemanes consideran en su orgánica a los sistemas de simulación, esto en consideración a que son herramientas útiles para que el comandante pueda entrenar y evaluar a las UF y menores. Existe una tendencia negativa en Chile en relación con lo indicado, al buscar asignarle a los subcentros de entrenamiento (SCEs) de tanques, misiones similares al CE-COMBAC, restándole autonomía al comandante de la unidad para el empleo de los medios de simulación. Además de lo anterior, al estar estos medios puestos a disposición de una plana mayor, su dirección y empleo podría quedar a cargo de personas poco competentes.- El Ejército de Chile emplea el software Steel Beast de forma constructiva en los cursos de formación y perfeccionamiento desarrollados por la Escuela de Caballería Blindada. De igual forma, es empleado por el CECOMBAC para la asistencia al entrenamiento y evaluaciones de la eficiencia de combate de los pelotones de tanques. Para la simulación virtual, actualmente se emplean los simuladores ASPT y AGPT presentes en el CE y en los SCEs de las UCs.- Como proyecto en desarrollo, el CEMSE está desarrollando el hardware (Mando del Comandante y Artillero) para poder combinar la simulación constructiva y virtual, en la ejecución de ejercicios multiescalón. Esto generará las condiciones para entrenar la conducción de las operaciones en un ambiente inmersivo, en donde la reacción a las órdenes y eficiencia de tiro no será ejecutada en forma automática por patrones predefinidos en el software.



Modelo austriaco de configuración de red para entrenamiento.

- Los países desarrollados consideran como promedio un perfil de uso para los tanques de 1.500 km anuales y 90 cartuchos por tripulación. Se estima como insuficiente, pero permite mantener un muy buen nivel de eficiencia, lo que se complementa con un amplio uso de simuladores.

Modernización del tanque Leopard 2A4 (Polonia)



Leopard 2A4 versión polaco.

- Lo interesante de esta modernización es que ya se ha implementado en estos tanques, siendo algunos de los aspectos que se requieren implementar en el material Leopard 2A4 en Chile. Como ejemplo es la unidad auxiliar de potencia (APU), cámara de retroceso para el conductor, aire acondicionado, nuevos visores termales, etcétera.



2.2 Proyectos nacionales (FAMAE)

VARIABLE	PROYECTO
Mantenimiento	<p>En el área del mantenimiento, la industria militar ha efectuado importantes aportes en términos de construir un instrumento que facilita las mediciones de continuidad del cableado interior de los tanques Leopard (ver figura N° 13).</p> <div data-bbox="702 513 865 735" style="text-align: center;"> </div> <p style="text-align: center;">Figura N° 13</p>
Vehículos de apoyo	<p>En un desarrollo conjunto de la industria militar con apoyo de Universidades Estatales, se abordó el tema de reemplazar los puentes clase 50 por otros de clase 70, como se observa en la figura N° 14.</p> <div data-bbox="598 920 971 1173" style="text-align: center;"> </div> <p style="text-align: center;">Figura N° 14: Carro tiende puente clase 70.</p>

2.3 Temas de investigación

VARIABLE	PROYECTO
Tiro sobre 4.000 msnm	<p>Durante el año 2015, se dio inicio al proyecto destinado a investigar el tiro de tanques sobre los 4.000 msnm, considerando las condiciones ambientales y balísticas en que este se realiza, con el propósito de medir funcionamiento de los sistemas que intervienen en el disparo.</p>
Tormentas eléctricas	<p>Se encuentra en pleno desarrollo la investigación destinada a conocer el cómo afectan las fenómenos climatológicos (tormentas eléctricas), a los sistema de funcionamiento eléctrico y electrónicos del tanque Leopard.</p>



3. CONCLUSIONES

A través de este artículo se han expuesto algunos de los avances y tendencias tecnológicas de los sistemas de armas relacionados con tanques y, principalmente, aquellos vinculados con la familia Leopard. Sin lugar a dudas que existe una amplia gama de líneas de investigación que se pueden derivar de los proyectos en desarrollo en países poseedores de este tipo de material, las que tendrían como objetivo incorporar estos progresos tecnológicos en nuestros sistemas de armas y ser desarrollados por la propia industrial militar y nacional. La disminución de los presupuestos de defensa en todos los países analizados, ha limitado la materialización de una serie de estudios e investigaciones que se han desarrollado a través del tiempo, por esta razón el tanque que actualmente es el referente, porque incorpora toda la tecnología disponible es el modelo Leopard 2A7 QAT (Qatar) (ver figura N° 15)



Figura N° 15: Leopard 2A7 QAT.

Se destaca el hecho de cómo la industria nacional ha sido capaz de desarrollar una serie de proyectos que, a pesar de los escasos recursos, han logrado resultados muy positivos y que optimizan los sistemas de armas de la fuerza terrestre. Así también, las características únicas de algunos escenarios de Chile, en los cuales se emplean los sistemas de armas, han hecho que nuestro país se ha ido transformando con el tiempo en un referente a nivel mundial, producto de los progresos, investigaciones, incorporación de tecnología, capacidad de adaptación, modernizaciones, etc., que son observadas con mucha atención e interés por todos los países integrantes de Leoben.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Conferencia anual 2015 Grupo Desarrollo de Combate, Leoben, Austria.
- [2] Experiencias unidades año 2015.
- [3] Proyectos de FAMA E.
- [4] Investigaciones y visitas realizadas por el autor del artículo.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**DERIVADOS DE FERROCENOS COMO CATALIZADORES
EN LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN DE
PROPELENTES**



DERIVADOS DE FERROCENOS COMO CATALIZADORES EN LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN DE PROPELENTES

Dr. César Morales-Verdejo.¹

Sr. Juan Luis Arroyo Escudero.²

Dr. Juan Manuel Manríquez Mujica.³

Dr. Rodrigo Ramírez-Tagle.⁴

Resumen: *Un gran número de derivados de ferroceno se han reportado como catalizadores de combustión en propelentes sólidos compuestos. Datos experimentales muestran que este tipo de catalizadores presentan velocidades de combustión superiores en comparación con catalizadores tradicionales. Dentro de esta serie los complejos bimetálicos poseen un mejor rendimiento que los derivados monometálicos. Aunque los derivados de ferroceno como catalizadores presentan efectos extraordinarios en la mejora de las velocidades de combustión de propelentes, estos poseen algunas desventajas, tales como, sublimación durante el proceso de curado y migración a la superficie del propelente después de prolongados tiempos de almacenamiento. Estas deficiencias pueden destruir la combustión constante de los propelentes y en algunos casos resulta un riesgo cuando se tiene una mezcla de perclorato de amonio ultra fino, debido a que son sensibles a las descargas electrostáticas, lo cual es muy peligroso e incluso conduce a una explosión en la fabricación de propelentes.*

Palabras clave: *Compuestos bimetálicos, Compuestos monometálicos, Ferroceno, Propelentes sólidos*

Abstract: *A large number of ferrocene derivatives have been reported as burning rate catalysts in composite solid propellants. Experimental data show that such catalysts exhibit higher burning rate compared to traditional combustion catalysts. Within this series bimetallic comple-*

1 Químico. Doctor en Química. Investigador y Académico Universidad Bernardo O'Higgins.

2 Bioquímico. Jefe Laboratorio de Materiales Energéticos, IDIC.

3 Químico. Doctor en Química. Investigador Universidad Bernardo O'Higgins.

4 Bioquímico. Doctor en Físicoquímica Molecular. Director de Investigación, Universidad Bernardo O'Higgins.



xes have better performance than monometallic derivatives. Although ferrocene derivatives BR catalysts have extraordinary effects in the enhancement of the burning rates of composite solid propellant, they have some disadvantages such as sublime during curing and processing, and migrate to the surface on the propellants after prolong storage times. These shortcomings can destruct the steady combustion of the propellants and in some cases result in danger when mixing with ultrafine ammonium perchlorate, because are sensitive to electrostatic discharge, which is very dangerous and even leads to an explosion in the fabrication of propellants.

Key words: *Bimetallic compounds, Monometallic compounds, Ferrocene, Solid propellants*

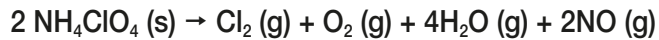
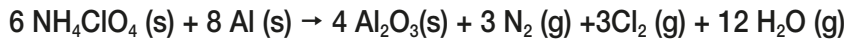
1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones tecnológicas en cohetaría son de gran interés debido al desarrollo de las industrias aeroespacial y defensa. Básicamente, un motor de cohete es la forma más simple de un dispositivo de conversión de energía. La materia en estado sólido o líquido se quema, produciendo gases calientes, estos gases se acumulan dentro de la cámara de combustión hasta que la presión acumulada es suficiente para obligar a una parte de ellos a salir fuera por el orificio de escape. El movimiento de los gases a través del orificio de escape da lugar a la conversión de energía térmica en energía cinética, o energía de movimiento.

Un motor cohete de propelente sólido moderno consta de metales finamente molidos que pueden servir como combustibles, los que se mezclan con sales inorgánicas que contienen un alto contenido de oxígeno (oxidantes). Las proporciones adecuadas de combustible y oxidante se suspenden en un material aglutinante que puede ser curado a un estado sólido al igual que el caucho en un neumático.

La mayoría de los cohetes producidos hoy en día están alimentados por propelentes sólidos compuestos basados en polibutadieno con hidroxilos terminales (*hydroxyl-terminated polybutadiene*; HTPB). El Propelente compuesto consta de tres ingredientes principales: HTPB, como combustible y aglutinante orgánico, perclorato de amonio (AP) como oxidante y polvo de aluminio como combustible metálico. En el presente escenario, el propelente sólido compuesto basado en (HTPB) se ha convertido en el estado del arte de propelentes para la propulsión de cohetes [1].

Las dos principales reacciones químicas, sin tener en cuenta el aglutinante, se muestran a continuación:



Un excelente propelente sólido debe tener una velocidad extremadamente estable de combustión (*burning rate* "BR") y un exponente de baja presión. La velocidad de combustión de un propelente, en su forma más simple, es la velocidad de conversión de sólido a gas en una dirección normal en una superficie de combustión plana, dicha velocidad de regresión se mide típicamente en milímetros por segundo (mm/s). Sabiendo cuantitativamente la velocidad de combustión de un propelente y cómo cambia en diversas condiciones, es de importancia fundamental en el éxito del diseño de un motor de cohete sólido.

Por otro lado, la velocidad de combustión puede ser calculada por medio de la ley de Saint Robert:

$$BR = bp^n$$

Donde **BR** es la velocidad de combustión, **b** es la constante de proporcionalidad, **p** es la presión y **n es el** exponente de presión de la velocidad de combustión, donde es posible deducir que los valores altos de **n** pueden producir grandes cambios en la velocidad con cambios relativamente pequeños en la cámara de presión con consecuencias potencialmente catastróficas, dado que una mayor velocidad de combustión da lugar a una mayor presión en la cámara.

Un propelente ideal debe tener una velocidad de combustión estable (3,1 mm/s en TPE y 6-12 mm/s a 68 atm) y un exponente de presión baja ($n = 0,3$ a $0,6$). Sin embargo, para ciertos propósitos específicos es necesario tener una velocidad de combustión más elevada. Para lograr este objetivo, los científicos han intentado varios métodos para mejorar la velocidad de combustión de propelentes sólidos compuestos. Las dos formas principales para aumentar la velocidad de combustión son: 1) reducir el tamaño de partícula oxidante y 2) la adición de un catalizador para acelerar la velocidad de combustión para el propelente [2,3].

La velocidad del propelente puede mejorarse significativamente por el uso de un oxidante, pero el oxidante debe tener un tamaño de partícula menor a 1 mm, que es difícil de producir, lo que hace que esta forma sea restringida. Además, la preparación del propelente con perclorato de amonio (AP) ultra-fino puede provocar una explosión [4], por lo que la alta velocidad de combustión es generalmente alcanzada por la combinación de los dos métodos mencionados anteriormente.



2. EL USO DE CATALIZADORES EN LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN DE PROPELENTES SÓLIDOS COMPUESTOS.

La descomposición térmica del AP tiene una estrecha relación con el proceso de combustión de los propelentes, por lo tanto, el efecto de un candidato como catalizador en la velocidad de combustión de propelentes sólidos compuestos, generalmente es evaluado por su efecto sobre la degradación térmica de AP.

Los primeros catalizadores evaluados como aceleradores en la descomposición térmica de propelentes basados en AP fueron los óxidos de metales de transición, tales como el óxido férrico (III) (Fe_2O_3), óxido de cobalto (Co_2O_3), óxido de manganeso (MnO_2), óxido de cromo (III) y cromito de cobre (II) (CuCr_2O_4), por mencionar algunos [5-8].

Hoy en día, los catalizadores incluyen partículas nano-metálicas [9-11], quelatos metálicos [12,13] y derivados de ferroceno (figura N° 1) [3,4,14-24]. Dentro de esta variedad, los derivados de ferroceno se han convertido en un componente indispensable en propelentes a base de HTPB/AP, debido a sus extraordinarios efectos en la mejora de las velocidades de combustión con índices de exponentes de presión bajos [21-22,25-27].

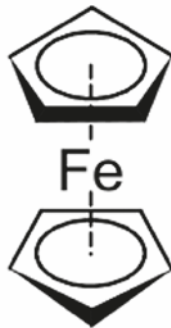


Figura N° 1: Estructura de Ferroceno.

Estos compuestos son químicamente compatibles con otros ingredientes de la composición del propelente que no afecten negativamente sus propiedades mecánicas. Además, poseen mejor homogeneidad microscópicas en la distribución, inflamabilidad superior del propulsor y muestran solamente una pequeña influencia sobre la sensibilidad al impacto, la fricción y el envejecimiento, incluso a altas concentraciones de 2-5% [28]. La adición de derivados de ferroceno como catalizadores en la velocidad de combustión da lugar a un cambio en las temperaturas máximas de AP, lo que acelera su descomposición, así como el aumento del calor liberado [3-4,14-27].



3. DERIVADOS DE FERROCENOS COMO CATALIZADORES EN LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN DE PROPELENTES SÓLIDOS COMPUESTOS.

Un gran número de derivados, tales como ferroceno *n*-butilo, 2,2-Bis(hierro ethyl-dicyclopentadienilo) propano (*Catoceno*), derivados de 2,4-dinitrophenyllhydrazine de acetil-ferroceno, 1-pirrolidinilo metil-ferroceno, ferroceno di-*t*-butilo, ácido dicarboxílico de ferroceno diésteres, 1,3-diferrocenilos-1-buteno, entre otros, han sido reportados [16,29-32] (figura N° 2). Estos estudios sobre la descomposición térmica de AP mostraron resultados superiores para mejorar las velocidades de combustión, en comparación con óxido férrico (Fe_2O_3), y dentro de estas series los complejos bimetalícos (figuras N° 2.a y 2.b)) poseen una mejor actividad catalítica que los derivados de mononucleares, mejorando así el rendimiento de la velocidad de combustión del propelente sólido compuesto.

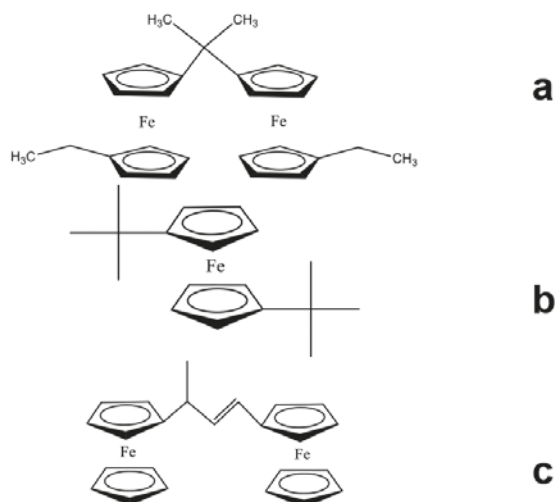


Figura N° 2: Estructura de a) *Catoceno* [(2,2-Bis(etildiciclopentadienilohierro) propano); b) di-*t*-butilferroceno; c) 1,3-diferrocenil-1-buteno.

Así, por ejemplo, Shen y colaboradores [33] reportaron el efecto del *Catoceno* en la descomposición térmica de AP por medio de calorimetría diferencial de barrido (DSC), Termo-gravimetría (TG) y pruebas de estabilidad de vacío manométrica (MVST) para investigar las características térmica de propelentes sólidos a base de HTPB/AP, revelan que el *Catoceno* juega un papel importante en la catálisis de la descomposición del AP.

Además, se estudió el efecto de la concentración del *Catoceno* (1, 3 y 5%) sobre la descomposición térmica con diferente tamaño de partícula, encontrando que la temperatura de reacción máxima de descomposición (T_m) del AP se redujo en presencia del compuesto ferrocénico cuando la concentración del *Catoceno* fue incrementada.

Por otra parte, se encontró que el mecanismo de descomposición de AP cambia con el tamaño de partícula de este.

Aunque los catalizadores derivados de ferrocenos presentan efectos extraordinarios en la mejora de las velocidades de combustión de propelentes sólidos compuestos, estos presentan algunas desventajas. Estos derivados son neutros y volátiles, que pueden sublimar durante el proceso de curado y migrar a la superficie sobre los propelentes después de tiempos de almacenamiento prolongados (figura N° 3). Estas deficiencias pueden destruir la combustión constante de los propelentes y en algunos casos resulta peligroso cuando la mezcla contiene AP ultrafino, debido a que son sensibles a descargas electrostáticas, lo puede conducir a una explosión en su fabricación [34].

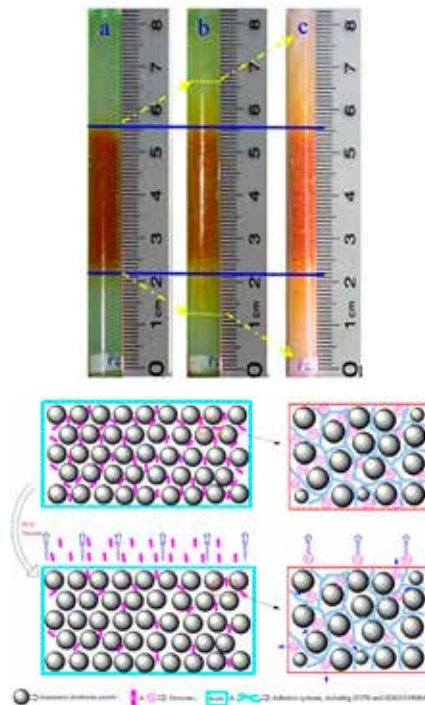


Figura N° 3: a) Fotos de migración para muestras, AP/HTPB/HDI con Ferroceno (Fc); b) Ilustración del mecanismo del fenómeno de sublimación en el sistema Fc/AP/HTPB/HDI. (Tomado de la referencia 21)

4. SÍNTESIS DE DERIVADOS DE FERROCENO Y SUS PROPIEDADES CATALÍTICAS, SOLUCIÓN AL MECANISMO DE ANTI-MIGRACIÓN

Muchos esfuerzos se han dedicado a retardar e incluso eliminar la tendencia a la migración de los catalizadores derivados de ferroceno. Una de las estrategias es incorporar grupos ferrocenilo en la cadena lateral o columna vertebral de polímeros usando



precursores de ferroceno con grupos funcionales propensos a la polimerización (figura N° 4) [19,21,22,25-27].

Un gran número de polímeros basados en ferroceno que utilizan ferroceno como columna vertebral, se han empleado como catalizadores en la velocidad de combustión en propelentes sólidos compuestos. Sin embargo, estos polímeros han mostrado propiedades no deseadas tales como la migración, donde estos compuestos viajan fuera de la matriz del aglutinante del propelente en el material de aislamiento que los rodea, lo que conduce a una combustión desigual y a un deterioro en la resistencia al envejecimiento con la formación de capas altamente sensibles [35, 36]. Además, la migración afecta a la capacidad de vertido de la suspensión del propelente en un grado significativo, así como la mecánica y las propiedades balísticas del propelente acabado.

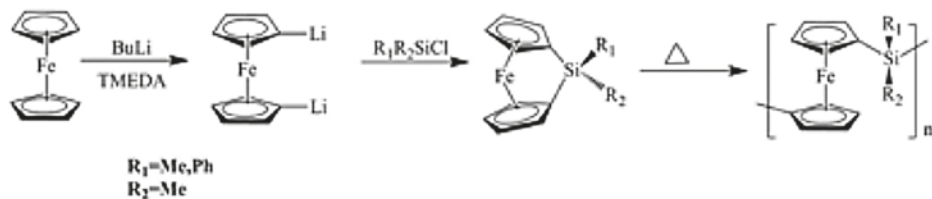


Figura N° 4: Ruta sintética de poli(ferrocenilsilanos).

En cuanto a los derivados de ferroceno de cadena lateral, French Dynamite Company desarrolló el compuesto llamado butaceno (R), que es un aglutinante HTPB con grupos ferrocenilos unidos en su cadena molecular (figura N° 5 (a)) [37]. Las unidades de ferroceno fueron adjuntadas en las cadenas laterales de HTPB aumentando la velocidad de combustión de los propelentes sólidos y la reducción de la movilidad. La incorporación de unidades de ferroceno en la columna vertebral del aglutinante durante el curado [38] o el injerto de unidades de ferroceno en estructuras hiper-ramificadas [18, 19] también son formas eficaces para mejorar las velocidades de combustión y retardar la tendencia a la migración.

Ghosh y colaboradores [32] estudiaron el efecto de la sustitución de HTPB con butaceno (R) en las propiedades físicas, mecánicas y balísticas, y la sensibilidad hacia el impacto y la fricción de los propelentes sólidos compuestos. La composición del propelente compuesto fue de 17% de Al, con porcentajes variables de butaceno(R).

Termogramas de DSC realizadas durante este trabajo (figura N° 5 (b)), mostró dos picos prominentes; el primero de ellos a menor temperatura, presenta una absorción de calor alrededor de 246° C, que corresponde al proceso endotérmico de transición de fase del AP, y el segundo pico presenta una reacción de liberación de calor en el rango de 395° C a 340° C para diferentes composiciones porcentuales, que corresponde a



la temperatura de descomposición del AP. Los datos indican que al aumentar el porcentaje de butaceno(R) en las composiciones disminuyen las temperaturas de inicio y la descomposición de los propelentes.

Cuando aumenta el porcentaje de butaceno(R) de 10% (AB-1) a 70% (AB-7), la temperatura de descomposición disminuye desde 361° C a 340° C. La reducción en la temperatura de descomposición es más prominente en los aumentos de porcentaje butaceno(R) desde 0% a 30% en el aglutinante. Los datos de DSC revelan que propelentes basados en Butaceno(R) encienden y se descomponen a temperaturas más bajas. Sin embargo, la preparación de butaceno(R) resulta con un rendimiento inferior al 25% [19, 39,40].

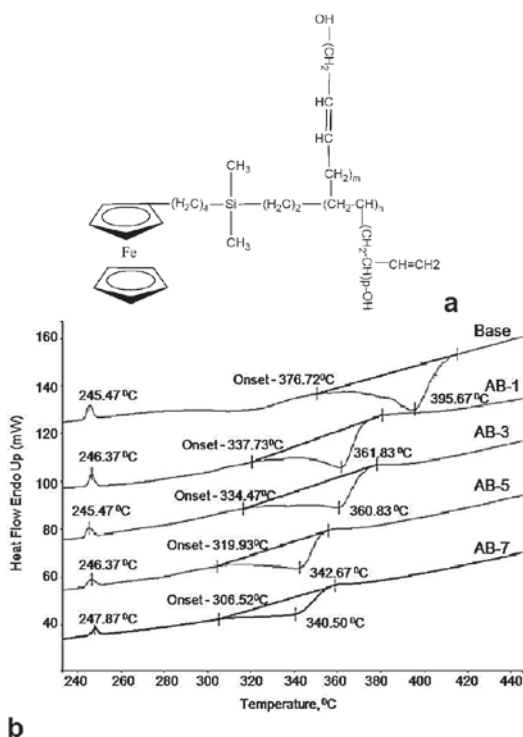


Figura N° 5: a) Estructura del butaceno(R); b) Termograma DSC de las composiciones con la variación porcentual % de butaceno(R). (Tomado de la referencia 32)

Por otro lado, durante los últimos años, los compuestos iónicos energéticos se han estudiado ampliamente por sus propiedades únicas, tales como bajas presiones de vapor, altas densidades, altos calores de formación, alta estabilidad térmica, etc., en comparación con sus análogos similares no iónicos [41-46]. En este contexto, Gao et al. [4,23-24] ha introducido el concepto de compuestos iónicos energéticos y su estrategia sintética modular en los catalizadores a base de ferrocenos, con el objetivo de retardar



las velocidades de migración de los catalizadores neutros y mejorar el nivel de energía del propelente. Se han diseñado y sintetizado una serie de compuestos iónicos a base de ferroceno utilizando como contra-ion, nitrato o picrato (figura N° 6). Estas clases de compuestos mostraron una tendencia a la migración bajo, y un efecto catalítico alto en la descomposición térmica de AP.

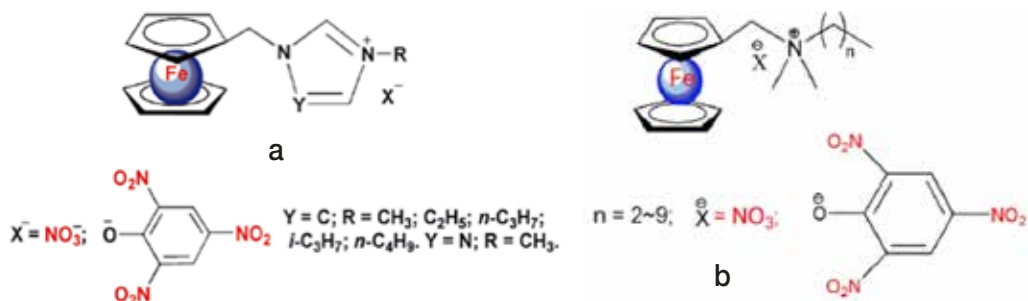


Figura N° 6: Estructuras molecular de **a)** nitratos y picratos de 1-ferrocenilmetil-3(4)-alquilimidazolio (triazolio); **b)** nitratos y picratos de alquildimetilammonio (ferrocenilmetil).

Las velocidades de migración de algunos compuestos de nitrato y picratos seleccionados se determinaron y fueron comparados con catoceno (Cat) [24]. Las movilidades relativas para un derivado de nitrato **3** (nitrato de 1-Ferrocenilmetil-3-propilimidazolio) y tres derivados de picratos **7** (picrato de 1-Ferrocenilmetil-3-metilimidazolio), **8** (picrato de 1-Ferrocenilmetil-3-etilimidazolio) y **9** (picrato de 1-Ferrocenilmetil-3-propilimidazolio), así como catoceno versus su distancia de migración y tiempo de envejecimiento se muestran en la figura N° 7.

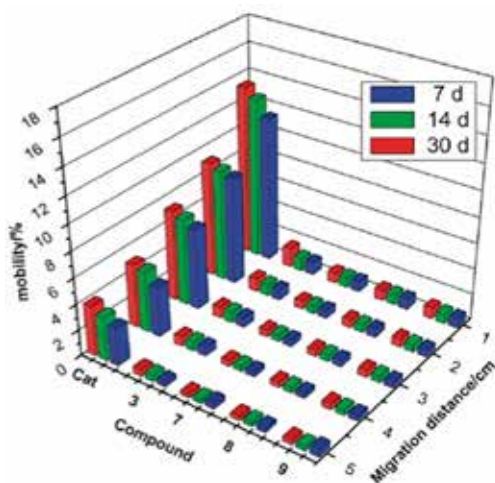


Figura N° 7: Dependencia del porcentaje de migración de **3**, **7**, **8**, **9** y catoceno sobre la distancia de migración y tiempo de envejecimiento a 70 °C. (Tomado desde la referencia 24)



Se observó que el porcentaje de migración de los compuestos iónicos fue mucho más bajo que los de catoceno. Por ejemplo, el porcentaje total de la migración del catoceno y los compuestos iónicos **3** y **7** durante 7 días fueron de 32,86%, 3,58% y 2,77%, respectivamente. También encontraron que para los compuestos **7**, **8** y **9** la tendencia a la migración aumenta con un aumento en la longitud de cadena alquilo en los anillos de imidazol, como se observa en otros compuestos de ferroceno iónicos reportados anteriormente. Además, también es notable que la velocidad de migración del picrato es menor que su análogo nitrato, teniendo en cuenta el peso molecular más alto de los derivados de picrato.

Sin embargo, sus actividades catalíticas son más bajas que las de catoceno y las de los compuestos de ferroceno iónicos **binucleares** reportados.

X. Liu et al. [23] reportó la síntesis de 14 nuevos derivados del ferroceno binuclear iónicos energéticos con alto rendimiento en la síntesis. Todos los compuestos, a excepción de dos de ellos, exhiben una alta estabilidad térmica y muestran velocidades de migración mucho más lenta que las del catoceno, además, todos los compuestos muestran una actividad catalítica similar o superior al catoceno en la descomposición térmica de AP.

5. COMPUESTOS BINUCLEARES DERIVADOS DE FERROCENO. POSTULACIÓN DEL MECANISMO DE ACCIÓN CATALÍTICA EN LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN DE PROPELENTES SÓLIDOS COMPUESTOS

En los últimos años el número de estudios sobre derivados ferrocenos binucleares, también conocidos como compuestos de doble núcleo de hierro, ha crecido explosivamente debido a su excelente rendimiento como catalizadores de combustión de propelentes sólidos compuestos. Y. Yuan preparó varios derivados del ferroceno binucleares ricos en nitrógeno y los resultados catalíticos de combustión mostraron que estos derivados del ferroceno presentan altos efectos catalíticos en la descomposición térmica de AP [47-49].

Por otro lado, Xiaoli Wang et al. [50] sintetizó una serie de nuevos derivados de alquilo de ferroceno binucleares tales como 2,2-bis (etilferrocene) propano, 2,2-bis (metilferrocene) propano y 2,2-bis (metilferrocene) butano, que también mostraron una baja volatilidad, buena estabilidad térmica, y actividad catalítica. Estos compuestos binucleares fueron comparados con las propiedades catalíticas de los compuestos de ferroceno mononuclear y se encontró un efecto catalítico mejorado en el rendimiento de velocidad de combustión.

En cuanto al mecanismo catalítico de combustión de compuestos derivados de ferroceno aún no está claro [51-59]. Se han propuesto cuatro mecanismos catalíticos



de: transferencia de electrones, transferencia de protones, formación de materiales de metales de transición y el mecanismo de interacción ácido-base.

K. Kishoreand y colaboradores [56] estudiaron los efectos de los diferentes óxidos metálicos Ni_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO_2 y Co_2O_3 en la reacción de descomposición térmica AP y se encontró que estos óxidos metálicos de transición podrían promover la descomposición del AP. El posible mecanismo de formación de Fe_2O_3 a partir de compuestos binucleares de ferroceno se muestra en el Esquema 1 [60]. Inicialmente al calentar dos núcleos de ferroceno cercanos entre sí, los anillos de Ciclopentadienilos (Cp) y los átomos de hierro comienzan a descomponerse bajo el ataque del átomo de oxígeno formado a partir de la descomposición de la AP. Luego los anillos Cp se oxidan para generar dióxido de carbono (CO_2). Mientras tanto, los átomos de hierro y los átomos de oxígeno reaccionan rápidamente para formar partículas finas de óxido de hierro Fe_2O_3 a escala nanométricas (del orden de 1×10^{-9} m). Estas partículas poseen mayor superficie específica que el polvo Fe_2O_3 común. La partícula de tamaño nano Fe_2O_3 es un catalizador excelente en la velocidad de combustión y puede acelerar la descomposición térmica de AP (figura N° 8).

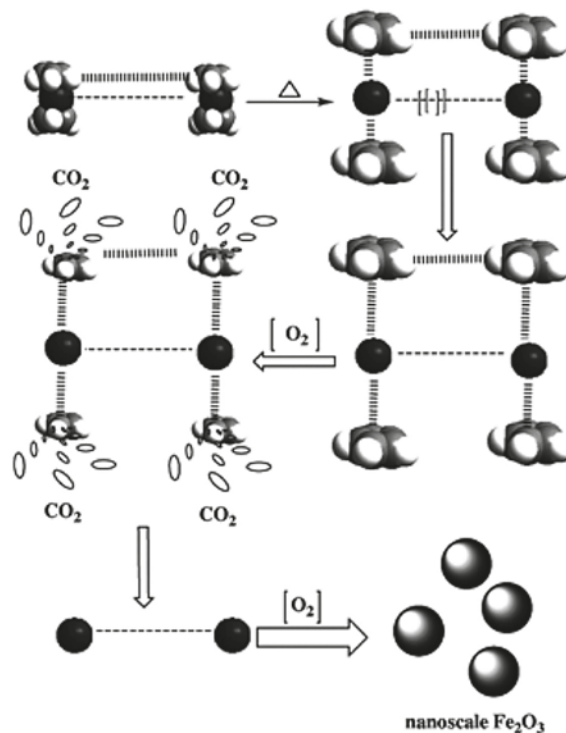


Figura N° 8: Posible mecanismo de formación de Fe_2O_3 nanoparticulado desde moléculas de ferroceno de doble núcleo. (Tomado desde la referencia 21)



6. CONCLUSIONES

Ferroceno y sus derivados son candidatos prometedores como catalizadores en la velocidad de combustión y son ampliamente utilizados en propelentes sólidos compuestos. Esta contribución ha revisado el reciente progreso de la investigación en la síntesis, funcionalización y aplicaciones de catalizadores de velocidad de combustión de compuestos de Ferroceno a base de polímeros y sus derivados. Aunque los avances notables han sido alcanzados en la síntesis de polímeros basados en Ferroceno y sus derivados, los cuales exhiben aplicaciones catalíticas concretas en la velocidad de combustión, las desventajas que presentan estos sistemas como la migración y fácil volatilización, obstaculizan el rendimiento catalítico de los propelentes. En el futuro cercano, una importante línea de investigación de estos catalizadores debería ser desarrollado tales como nanomateriales poliméricos híbridos multifuncionales, ya que estos polímeros serán capaces de reducir la dosis del agente aglutinante y posteriormente mejorar el carácter tecnológico y las propiedades mecánicas del propelente sólido compuesto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kuo KK, Summerfield M. Fundamentals of solid-propellant combustion. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1984.
- [2] Guo XD, Li FS, Song HC, Liu GP, Kong LR, Li Mn, Propellant Explos Pyrotech 33 (2008) 255-260.
- [3] D. Saravanakumar, N. Sengottuvelan, V. Narayanan, M. Kandaswamy, T.L. Varghese, J. Appl. Polym. Sci. 119 (2011) 2517-2524.
- [4] Z. Cheng, G. Zhang, X. Fan, F. Bi, F. Zhao, E. Zhang, Z. Gao, Inorg Chim Acta 421 (2014) 191-199.
- [5] I.P.S. Kapoor, P. Srivastava, G. Singh, Propellants Explos. Pyrotech. 34 (2009) 351-356.
- [6] Z. Ma, F. Li, H. Bai, Propellants Explos. Pyrotech. 31 (2006) 447-451.
- [7] S.R. Chakravarthy, E.W. Price, R.K. Sigman, J. Propul. Power 13 (1997) 471-480.
- [8] K. Fujimura, A. Miyake, Sci. Technol. Energy Mater. 69 (2008) 149-154.
- [9] P.R. Patil, V.N. Krishnamurthy, S.S. Joshi, Propellants Explos. Pyrotech. 33 (2008) 266-270.



- [10] P.R. Patil, V.N. Krishnamurthy, S.S. Joshi, *Propellants Explos. Pyrotech.* 31(2006) 442-446.
- [11] K. Jayaraman, K.V. Anand, S.R. Chakravarthy, R. Sarathi, *Combust. Flame* 156 (2009) 1662-1673.
- [12] J.S. Wang, Y. Liu, H.B. Zhao, J. Liu, D.Y. Wang, Y.P. Song, Y.Z. Wang, *Polym. Degrad. Stab.* 94 (2009) 625-631.
- [13] A.M. Kawamoto, L.C. Pardini, L.C. Rezende, *Aerosp. Sci. Technol.* 8 (2004) 591-598.
- [14] N. Dilsiz, A. Ünver, *J. Appl. Polym. Sci.* 101 (2006) 2538-2545.
- [15] G. Gore, R. Bhatewara, K. Tipare, A. Nazare, S. Asthana, *J. Propul. Power* 20 (2004) 758-760.
- [16] G. Gore, K. Tipare, R. Bhatewara, U. Prasad, M. Gupta, S. Mane, *Def. Sci. J.* 49 (1999) 151-158.
- [17] A. Ünver, N. Dilsiz, M. Volkan, G. Akovalı, *J. Appl. Polym. Sci.* 96 (2005) 1654-1661.
- [18] K. Subramanian, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* 37 (1999) 4090-4099.
- [19] F. Xiao, F. Feng, L. Li, D. Zhang, *Propellants Explos. Pyrotech.* 38 (2013) 358-365.
- [20] L.L Liu, G-q. He, Y-h Wang, P-j. Liu, *J. Therm. Anal. Calorim.* 117 (2014) 621-628.
- [21] R. Tong, Y. Zhao, L. Wang, H. Yu, F. Ren, M. Saleem, W.A. Amer, *J. Organomet. Chem.* 755 (2014) 16-32.
- [22] X. Tang, *J. Wuhan Inst. Technol.* 34 (2012) 19-25.
- [23] X. Liu, D. Zhao, F. Bi, X. Fan, F. Zhao, G. Zhang, W. Zhang, Z. Gao, *J. Organomet. Chem.* 762 (2014) 1-8.
- [24] X. Liu, W. Zhang, G. Zhang, Z. Gao, *New J. Chem.* 39 (2015) 155-162.
- [25] J. Gao, L. Wang, H. Yu, A. Xiao, W. Ding, *Propellants, Explos., Pyrotech.* 36 (2011) 404-409.



- [26] X. Zhang, Y. Xia, L. Jia, J. Chi, W. Chang, J. Wang, *Chin. J. Chem. Propellants Polym. Mater.* 10 (2012) 58-64.
- [27] R. Zhang, J. Li, W. Wong, *Chin. J. Propul. Technol.* 3 (1994) 62-65.
- [28] Menke K., Boehnlein-Mauss J., Brehler K.P., Jungbluth H., Kalischewski W., *New Ferrocenes for Burn rate Modification of Composite Propellants*, Proc. ADPA Int. Symp. on Energetic Materials Technology, Phoenix, Arizona, US, Sept. 24-27, 1995.
- [29] J. Boehnlein-Mauss, M.A. Bohn, K. Menke, K. Gottlieb, H. Jungbluth, G. Lohmann, W. Thunker, K.P. Brehler, *Structural influences of ferrocenes on Burn rate modification of composite rocket propellants*, 24th, Int. Annu. Conf. ICT, Karlsruhe, Germany, 1993, 71/1-71/19.
- [30] M.P. Hong, B.J. Lee, *Pollimo* 21 (1997) 302-308.
- [31] H. Mackowiak, K. Gottlieb, *PCT Int. Appl.* WO 9850396, 1998.
- [32] K. Ghosh, S. Behera, A. Kumar, B. Padale, D. Deshpande, A. Kumar, M. Gupta, *Cent. Eur. J. Energ. Mat.* 11 (2014) 323-333.
- [33] S.M. Shen, S.W. Wang, Y.S. Chiu, S.I. Chen, F.M. Chang, C.C. Huang, *Thermochim Acta* 216 (1993) 135-143.
- [34] J. Gao, L. Wang, H. Yu, A. Xiao, W. Ding, *Propellants, Explos. Pyrotech.* 36 (2011) 58-64.
- [35] M. Alfonso, A. Tarraga, P. Molina, *Dalton Trans.* 39 (2010) 8637-8645.
- [36] H. Aoki, A. Kitajima, H. Tao, *Supramol. Chem.* 22 (2010) 455e460.
- [37] J.K. Chen, S.S. Cheng, S.C. Chou, in: *AIAA, ASME, SAE and ASEE, Joint Propulsion conference and Exhibit, 30th*, Indianapolis, in United States, 1994, p. 27.
- [38] R. Tong, Y. Zhao, I. Wang, H. Yu, F. Ren, M. Saleem, J. Organometall, *Angew. Chem., Int. Ed.* 755 (2014) 16.
- [39] K. Subramanian, K. S. Sastri, *J. Appl. Polym. Sci.* 90 (2003) 2813.
- [40] X. X. Jian, L. Q. Xiao, Q. A. Huang, W. L. Zhou, F. M. Xu, *J. Solid Rock. Technol.* 32 (2009) 314.



- [41] H. Gao, J.M. Shreeve, Chem. Rev. 111 (2011) 7377.
- [42] G. Steinhauser, T.M. Klapoetke, Angew. Chem., Int. Ed. 47 (2008) 3330.
- [43] M. Smiglak, A. Metlen, R.D. Rogers, Acc. Chem. Res. 40 (2007) 1182.
- [44] R.P. Singh, H. Gao, D.T. Meshri, J.M. Shreeve, in: T.M. Klapoetke (Ed.), Nitrogenrich Heterocycles in High Energy Density Materials, Springer, Berlin, 2007, p.35.
- [45] T.M. Klapoetke, in: T.M. Klapoetke (Ed.), New nitrogen-rich high explosives in high energy density materials, Springer, Berlin, 2007, p. 85.
- [46] R.P. Singh, R.D. Verma, D.T. Meshri, J.M. Shreeve, Angew. Chem., Int. Ed. (2006) 3584.
- [47] C. Ke, H. Li, L. Xie and Y. Yuan, Chin. J. Energ. Mater., 19 (2011) 19–22.
- [48] W. Liao, Y. Dou, J. Wang, L. Xie, F. Lin and Y. Yuan, Chem. Res. Chin. Univ., 33 (2012) 2244–2248.
- [49] J. Wang, L. Feng, F. Ma, F. Lin, L. Xie and Y. Yuan, Chin. J. Org. Chem., 32 (2012) 1479–1486.
- [50] 王晓莉, 温国华, 温国永, 等. [J]. 化学试剂 31 (2009) 924-926.
- [51] Y. Gao, H. Li, C. Ke, L. Xie, Y. Yuan, Chem. Propellants Polym. Mater. 8 (2010) 34-37.
- [52] A. Galwey, P. Jacobs, Trans. Faraday Soc. 55 (1959) 1165-1172.
- [53] S. Vyazovkin, C.A. Wight, Chem. Mater. 11 (1999) 3386-3393.
- [54] A.K. Galwey, M.A. Mohamed, Nature 311 (1984) 642-645.
- [55] K. Kishore, V.R.P. Verneker, M. Sunitha, G. Prasad, Fuel 56 (1977) 347-348.
- [56] V.R. Pai Verneker, K. Kishore, B.K. Chaturvedi, M. Ramanath, Propellants Explos. Pyrotech. 6 (1981) 158-160.
- [57] K. Kishore, V. Pai Verneker, M. Sunitha, AIAA J. 18 (1980) 1404-1405.



- [58] Gao Jingmin, Study on Synthesis, Characterization and Application of Ferrocene-based Compounds and Ferrocene-based Polymers and Their Grafted Carbon Materials, (PhD thesis), Zhejiang University, 2011.

- [59] Wang Jianjun, Study on Synthesis and Properties of Branched Molecules with Functional Terminal Groups, (Master thesis), Zhejiang University, 2010.

- [60] J. Gao, L. Wang, Y.I. Tai, J. Wang, J. Huo, A.M. Amin, H. Yu, W. Ding, J. Propul. Power 27 (2011) 1143-1145.



ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

Avda. Valenzuela Llanos N° 623

La Reina, Santiago, Chile.

www.acapomil.cl