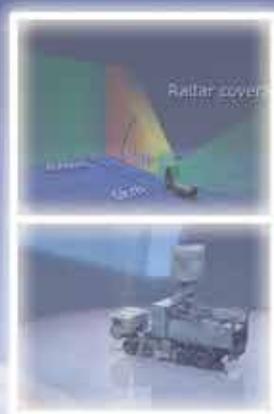




EJÉRCITO DE CHILE
ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

Boletín Científico Tecnológico

Nº21



2016 - 2017

ISSN 0718-1191



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 21, JULIO 2017 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 Héctor Inostroza Montero

Oficial de Ejército del arma de Infantería. Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas mención Mecánica de la Academia Politécnica Militar. Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento de la Universidad Técnica Federico Santa María. Actualmente se desempeña como Jefe del Centro de Estudios en Ciencia y Tecnología de la Academia Politécnica Militar.

CONSEJO EDITORIAL

Presidente

Coronel Sergio Nazar Martínez

Director de la Academia Politécnica Militar

Consejeros

Coronel Luis Araya Cano

Teniente Coronel Víctor Cantillana Vera

Teniente Coronel Carlos Prado Casanova

Teniente Coronel Rodrigo Guajardo Santana

Teniente Coronel Cristián Díaz Godoy

Mayor Edgardo Merino Morong

Profesor Civil Aquiles Sepúlveda Osses



SUMARIO

Editorial	11
Desmilitarizado, propósito, técnicas de desarme y disposición final	15
Operación de sistemas de radar de vigilancia de campo de batalla bajo condiciones de camanchaca	29
Mecánica computacional como herramienta para el diseño de ingeniería de defensa	45
Nuevas formas de carbono y sus aplicaciones en defensa	69
Aplicaciones de la termodinámica a la determinación de parámetros propios de explosivos y propelentes de uso militar.....	93

EDITORIAL



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR



EDITORIAL



SERGIO NAZAR MARTÍNEZ
Coronel
Director de la Academia Politécnica Militar

La intención declarada por el instituto es generar investigación, desarrollo e innovación en el ámbito de la ciencia y tecnología para apoyar el currículo de la ingeniería militar y a otros organismos institucionales, brindando asesoría al Alto Mando institucional para, de esta forma, aportar conocimiento a la comunidad académica nacional e internacional, a través de la instauración y generación de áreas y líneas de investigación.

De esta forma la Academia Politécnica Militar considera asimilar procedimientos de investigación y docencia al nivel de las instituciones de educación superior, tanto por una necesidad cierta de compatibilidad de procedimientos e idealmente el de intercambio de conocimientos con toda la comunidad científica.

De esta manera el instituto ha conducido investigaciones, a fin de optimizar la asesoría en momentos de crisis; simultáneamente, experimentando nuevas tácticas de combate introduciendo en ellas los nuevos conceptos de gestión de riesgos.



Así, la investigación militar muestra distintas facetas, unas más próximas a la investigación pura y otras a la aplicada, dependiendo en gran medida de las necesidades mediatas e inmediatas que la realidad imponga.

En cuanto a las posibles áreas de complementariedad de la investigación militar y civil, una acción conjunta podría asumirse en los ámbitos de la geodesia y ciencias de la tierra, simulación computacional, estudios nucleares, producción de elementos químicos y metalmecánicos y estudios para potabilización y desalinización de aguas, control de calidad de alta definición, medicina y salud, desmilitarizado humanitario, entre otras.

En este aspecto es importante, en forma permanente, formular y ejecutar proyectos de I+D que permitan la transferencia tecnológica en áreas de la Ciencia y Tecnología de aplicación militar principalmente y/o civil, y de manera secundaria, en apoyo a procesos institucionales y a la resolución de problemas de la fuerza terrestre, con la finalidad que sean de apoyo a la toma de decisiones en el ámbito gubernamental.

En esta edición se pretende incentivar la capacidad de identificar los avances en materias de tecnología militar, en relación con el desarrollo de la Fuerza, para por medio de esto, analizar su incorporación en las futuras mallas curriculares o a través de actividades de extensión, permitiendo estar a la vanguardia de los cambios tecnológicos mediante un monitoreo constante de las áreas de investigación.

No podemos dejar de mencionar la importancia de administrar esta nueva generación de conocimiento, a través de una plataforma centralizada y robusta que permita la difusión escrita y/o implementación de herramientas tecnológicas que permitan construir la memoria organizacional y promover su divulgación en distintos niveles, lo que se conoce como una óptima Gestión del Conocimiento lo que queda plasmado en este Boletín Científico.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**DESMILITARIZADO, PROPÓSITO, TÉCNICAS
DE DESARME Y DISPOSICIÓN FINAL**



DESMILITARIZADO, PROPÓSITO, TÉCNICAS DE DESARME Y DISPOSICIÓN FINAL

TCL. (IPM) Leonardo Albornoz Salinas.¹

Resumen: *El presente artículo tiene como objetivo dar a conocer algunos conceptos básicos para entender que es el desmilitarizado, apoyando dicha temática con descripciones de técnicas de extracción y técnicas de detonación de explosivos y elementos pirotécnicos, y de algunos equipos asociados a los procesos expuestos.*

Palabras claves: *Desmilitarizado, extracción de explosivos, detonación de componentes.*

Abstract: *The aim of the present article is to present some basic concepts to understand what demilitarization is, by supporting this subject with descriptions of extraction techniques and techniques of detonation of explosives and pyrotechnic elements, and of some equipment associated to the said processes.*

Key words: *Demilitarization, extraction of explosives, detonation of components.*

1. INTRODUCCIÓN

Para todas las instituciones armadas del mundo, el tratamiento adecuado y disposición final de aquellos dispositivos explosivos que forman parte de las municiones obsoletas y UXOs (unexploded ordnance, munición no detonada) ha sido una constante preocupación, teniendo como principal cuidado el aspecto **seguridad**.

Debido a lo anterior, se desarrolla un proceso que se conoce como desmilitarizado, que implica: separar una munición, artefacto explosivo o elemento pirotécnico, en el máximo de piezas posibles, apartando los elementos inertes de aquellos de carácter explosivo, donde los elementos metálicos serán tratados para sacar las trazas de explosivos, para que posteriormente estos sean destruidos, como se ilustra en la figura N° 1.

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Química.



Figura N° 1: Municiones para desmilitarizar.

Fuente: FAMAE

La realización de un proceso de desmilitarizado implica planificar en forma detallada las actividades que deben ser desarrolladas y ejecutadas por un equipo de trabajo competente. Dentro de las acciones que se deben considerar, se encuentran las siguientes [1]:

- Inspeccionar visualmente la munición en el sitio donde ella se encuentre.
- Verificar los embalajes.
- Tomar muestra de propelente si no implica riesgo.
- Verificar la accesibilidad al lugar donde se encuentra la munición.
- Definir vías de evacuación en caso de emergencia.
- Definir protocolo de embalaje para transporte.
- Definir protocolo de traslado de munición del lugar donde debe ser evacuada la munición para su desmilitarización.
- Estudiar la factibilidad técnica de desarme (planimetría, configuración, manuales, experiencia, instrucciones de trabajo).
- Determinar el lugar de almacenamiento en planta de desmilitarizado.
- Realizar el estudio económico del desmilitarizado.
- Verificar los equipos, herramientas e instalaciones.
- Definir el proceso de desarme.
- Definir la disposición final de las piezas metálicas y componentes explosivos.
- Definir los procesos y el lugar de destrucción.

Una vez ejecutados los procesos antes descritos y de acuerdo a cada caso en particular, el trabajo en planta comienza con el desarme de la munición; este consiste en separar la munición en cada una de sus partes, como se observa en la figura N° 2, que representa parte de granadas de mortero (cabeza, espoleta, cuerpo, sistema iniciador y propelente).



Después se separan las partes metálicas libres de explosivos o propelentes (inertes) de aquellos componentes de carácter explosivo. Cada elemento agrupado de acuerdo a lo anterior es almacenado en dependencias acondicionadas para cada tipo de material. A continuación, se define el siguiente paso: desarme o destrucción.



Figura N° 2: Partes y piezas de munición de morteros.

Fuente: FAMAE

El desarme o destrucción se lleva a cabo, a través de un ensamble inverso o desmenzamiento mecánico, el que se realiza con dispositivos y/o herramientas fabricadas de acuerdo a la configuración de la munición (geometría, tipo de ensamble, componentes, tipo de explosivos, etc.). Alternativamente, se pueden utilizar dispositivos mayores fabricados por otras unidades de desmilitarizado, que pueden ser adquirido a través de una asesoría técnica, ver figura N° 3.



Figura N° 3: Máquina para desarme de elementos atornillados de municiones de calibre mayor.

Fuente: FAMAE



Es necesario supervisar y verificar las actividades de desmilitarizado durante todo el proyecto. Esto debe hacerse a fin de velar porque la tarea se realice cumpliendo con la planificación acordada y que el registro de la misma se lleve de manera apropiada y precisa para que al término de la actividad se emitan los certificados correspondientes de destrucción, los que deben ser validados por la autoridad oficial competente.

2. DESARROLLO

En la etapa de desarme del desmilitarizado de municiones existen diferentes técnicas disponibles. Su elección depende de lo que se pretenda: ya sea extracción del explosivo principal, propelentes o bien detonación de componentes para aquellos elementos que presenten un riesgo al tratar de desarmarlos, ver figura N° 4.



Figura N° 4: Desarme de espoletas de morteros.

Fuente: FAMAE

2.1. Técnicas de fusión

Dentro de las técnicas aplicadas para extraer el explosivo primario o compuesto principal contenido en una cabeza de guerra, se utiliza el fundido ver figura N° 5. [1]. Este proceso consiste en llegar a la temperatura de cambio de estado (sólido a líquido), lo que se logra sumergiendo parte de la cabeza de guerra en agua caliente, mientras va fijada a un soporte diseñado para cada modelo. La temperatura del agua es controlada a través de sistemas automáticos (PLC). Ya que parte del set up² del equipo considera la temperatura de fusión

2 *Set up*: corresponde a la preparación del equipo, se parametrizan los valores de temperatura de trabajo, volumen de agua y tiempo de fundido.



del elemento a tratar, es necesario contar con este dato, el que se obtiene de la bibliografía, a través del fabricante o por registros históricos en poder de la planta de desmilitarizado.



Figura N° 5: Fundido de TNT de bombas de mortero.

Fuente: FAMAE

Al utilizar agua como elemento conductor de calor (convección), en la mayoría de los casos ella se contamina con el explosivo fundido. De esta manera se genera un líquido contaminado que debe ser tratado antes de ser vertido al suelo o al agua (ríos, canales, napas, etc.) se requiere entonces una planta de tratamiento para filtrar y extraer las partículas y trazas de explosivos que pueda contener el líquido, antes de ser devuelto al medioambiente, ver figura N° 6.



Figura N° 6: Sistema de tratamiento de aguas contaminadas.

Fuente: Manual de la OSCE [4], mejores prácticas sobre munición convencional.



2.2. Técnica criogénica

La técnica criogénica se emplea para la desmilitarización de municiones químicas; en este caso, la munición es enfriada sumergiéndola en un recipiente con nitrógeno líquido, ver figura N° 7, donde se muestran elementos explosivos sometidos a la técnica en comento. Como consecuencia de las bajas temperaturas impuestas por este baño (-196 °C), el acero del vaso contenedor del explosivo se fragiliza. Bajo estas condiciones, la munición es trasladada inmediatamente después a una prensa hidráulica con el fin de fracturar el contenedor y recuperar el material explosivo o agente químico mantenido en su interior.

Es muy relevante que la baja temperatura impuesta impida la evaporación del agente químico, el que es procesado posteriormente en hornos especiales con capacidad de tratar gases tóxicos.



Figura N° 7: Técnica criogénica.

Fuente: Manual de la OSCE [4], mejores prácticas sobre munición convencional.

2.3. Técnica de vaciado mediante agua a presión

El principio de vaciado con flujo de agua a alta presión de cargas explosivas inicialmente contenidas en un vaso, se ejecuta con la utilización de un inyector de alta presión. El flujo de agua impacta directamente a la carga explosiva (TNT, RDX, etc.), mediante una boquilla rotativa, ver figura N° 8. El vaciado a través de esta técnica permite extraer cualquier tipo de carga explosiva de su contenedor metálico. El vaciado es especialmente apto para la extracción de explosivos plásticos (PBX) y de otros tipos de explosivos no fundidos.



Figura N° 8: Extracción de explosivo a través de flujo de agua a alta presión.

Fuente: Manual de la OSCE [4], mejores prácticas sobre munición convencional.

2.4. Técnica de vaciado con disolventes

Esta técnica emplea una sustancia disolvente capaz de diluir los explosivos con facilidad. Dado que muchos de los explosivos (TNT y el RDX) son insolubles en agua, se debe seleccionar el tipo de agente químico adecuado. Para lograr la separación de la mayoría de los explosivos se utilizan cloruro de metileno, alcohol metílico, acetona o tolueno. Para lo anterior es necesaria la utilización de grandes volúmenes de disolvente, así como también es imprescindible disponer de instalaciones de gran tamaño para el almacenaje y la recuperación de estos. El vaciado a través de este procedimiento permite el reciclaje de los explosivos. Esta técnica solo es aplicable para pequeñas cantidades de munición.

2.5. Técnicas de detonación

Para los elementos que deben ser destruidos existen técnicas mediante la aplicación de choques térmicos que son realizados en hornos rotatorios o de solera, especialmente contruidos para tal efecto con paredes de acero resistentes y en algunos casos reforzados a través de mangas cerámicas. Las temperaturas y tiempos de exposición al calor están definidos por el tipo, tamaño y cantidad de explosivo a destruir. Otra manera de dar una disposición final a los mencionados elementos es a través de detonaciones controladas en un sector abierto, claramente definidas e identificadas, conocidas como zona de destrucción, a la que su acceso es restringido.

Para las detonaciones en hornos se debe calcular la capacidad máxima de explosivo a detonar, de acuerdo a la resistencia de las paredes del horno respecto a la onda expansiva y la presión (volumen de gases) que genera la detonación (figura N° 9). Ge-



neralmente estos hornos están conectados a un sistema de extracción de gases, los que son filtrados antes de enviarlos al medioambiente. Para este caso toman relevancia las características de los filtros con los que se realiza el proceso. [2]



Figura N° 9: Horno rotatorio para detonación.

Fuente: EXPAL SYSTEMS

Para el caso del material que debe ser detonado en zonas abiertas, este trabajo debe realizarse mediante un proceso de detonación controlada en cadena mediante cargas cebos que estén constituidas por cargas comunes. Se deben tomar precauciones respecto del ruido, la onda expansiva y los fragmentos o esquirlas. El horno antes mencionado puede estar montado en una plataforma móvil o en una instalación fija.

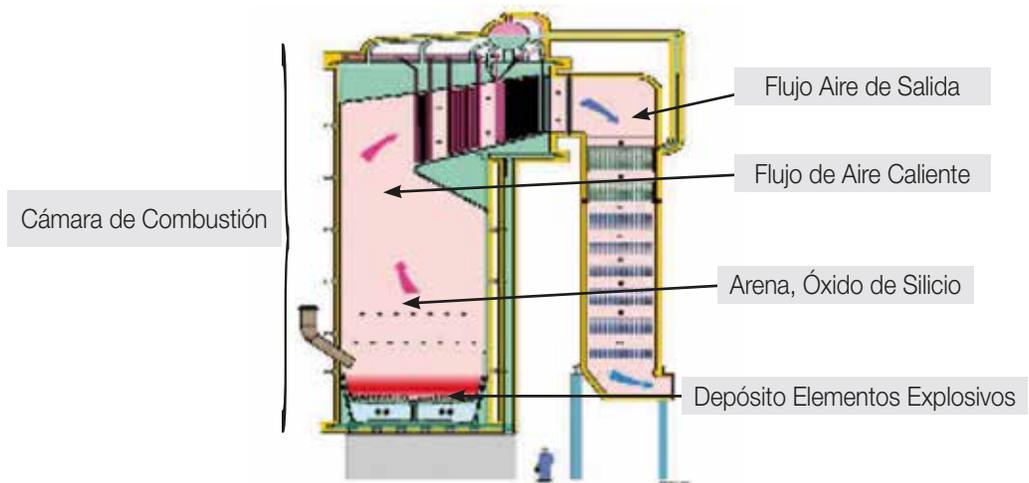


Figura N° 10: Horno de lecho fluinizado.

Fuente: Manual de la OSCE [4] , mejores prácticas sobre munición convencional.



Otra técnica consiste en lograr la detonación de los componentes explosivos a través de un horno de lecho fluidizado (Figura N° 10), en el que se utiliza una especie de arena (óxido de silicio) la que entrará en contacto con el flujo de aire caliente. Las partículas de esta arena entran en suspensión y adoptan un comportamiento de fluido, lo que conlleva a tener un ambiente más seguro para generar la incineración de residuos explosivos.

OTRAS TÉCNICAS PARA EXTRACCIÓN DE EXPLOSIVOS

2.6. Técnica oxidación por agua supercrítica

La oxidación por agua supercrítica (SCWO), también conocida como oxidación hidrotérmica, destruye residuos orgánicos tóxicos y peligrosos en un sistema compacto, totalmente hermético. Eso hace que sea una tecnología interesante para la destrucción de elementos pirotécnicos que contengan cloro, pero también para las municiones con agentes químicos o irritantes. Es un proceso de alta tecnología.

2.7. Técnica de pirólisis por arco de plasma

La tecnología de incineración por pirólisis por arco de plasma se desarrolló para destruir residuos peligrosos, tales como los agentes químicos que contienen arsénico. El reactor de plasma empleado consiste en una centrifugadora interna en la que el material de residuos peligrosos es calentado (antorcha de plasma) por medio de un arco de plasma que alcanza una temperatura de aproximadamente 20.000 °C. Las aguas residuales del sistema de lavado de gases son tratadas en una unidad de evaporación de agua. De esa manera se evita el vertido de las aguas contaminadas a la red local. En atención a su contenido de metales tóxicos, los residuos secos de la evaporadora deben ser trasladados a un vertedero de residuos peligrosos.

Dado que el producto final del reactor será un compuesto vítreo en el que quedarán atrapados los componentes tóxicos, ese producto final tendrá que almacenarse en un vertedero de residuos peligrosos. Los compuestos energéticos (explosivos, propelentes y pirotécnicos) expuestos a una pequeña cantidad de oxígeno, se convierten en el interior del reactor de plasma en productos gaseosos por oxidación, que están compuestos principalmente de monóxido de carbono, dióxido de carbono y pequeños hidrocarburos como metano, eteno y etano. Los hornos de arco de plasma tienen una fase de calentamiento muy breve (necesitan alrededor de 5 minutos para estar plenamente operativos). Este proceso requiere grandes cantidades de energía y es muy costoso, pero resulta muy indicado para la neutralización de ciertos tipos de armas químicas. Este procedimiento, además, es utilizado para la descontaminación de partes metálicas.



2.8. Técnica de oxidación electroquímica

La tecnología AEA, SILVER IITM, se basa en la naturaleza altamente oxidante de los iones de (Ag_2^+) ,³ que se generan haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una solución de nitrato argéntico en ácido nítrico, dentro de una cuba electroquímica, similar a las utilizadas en los procesos electroquímicos industriales. Las reacciones electroquímicas usadas en la tecnología SILVER IITM pertenecen a una clase de procesos químicos conocidos comúnmente como oxidación electroquímica mediada (MEO). Estos procesos están siendo presentados como una alternativa a la incineración convencional relacionada con la destrucción de residuos peligrosos. La experiencia con este tipo de procesos es limitada debido a que su desarrollo y aplicación son relativamente recientes. Este proceso puede usarse para la neutralización de explosivos primarios, tales como el nitruro de plomo y el trinitrorresorcinato de plomo.

2.9. Técnica de biodegradación

La biodegradación utiliza la capacidad de los microorganismos de descomponer sustancias químicas relacionadas con la munición, tales como el TNT y otros componentes explosivos y propelentes. [3] La biodegradación se puede realizar como un proceso químico en equipos de tipo reactor. Se necesitarán instalaciones de almacenamiento de gran tamaño, ya que sus tasas de reacción son lentas. En la tierra ya están presentes grandes cantidades de microorganismos dispuestos a convertir sustancias químicas. La presencia de metales pesados en el material a degradar, incorporados para evitar la erosión en cañones o como inhibidores del índice de combustión presenta un efecto negativo sobre la acción biodegradante de los microorganismos, ya que contamina el suelo cuando los materiales a destruir son enterrados. Así, la opción del reactor es más apropiada para el tratamiento de residuos explosivos con altas concentraciones de dichos metales.

3. CONSIDERACIONES ACTUALES

Los métodos basados en las mejores prácticas pueden mitigar los riesgos de la desmilitarización de munición con unos costos y un impacto medioambiental mínimos. La posibilidad de aplicación de cada una de las técnicas dependerá en gran medida de la situación de cada lugar en particular y de la economía de escala.

3 (Ag_2^+) , corresponde a 2 átomos de plata con carga positiva, es decir, posee 2 protones libres para enlazarse a un elemento con 2 cargas libres negativas, para generar una oxido reducción.



Cuando no es posible el reciclaje, los explosivos deben ser destruidos. Una tecnología actualmente en desarrollo, que se encuentra en fase de estudio, es la transformación de explosivos en productos residuales. Eso se consigue mezclando el material energético con agua y aditivos; los residuos podrán ser incinerados con garantías de seguridad y con procedimientos claramente definidos en cualquier instalación comercial.

Sin embargo, en la actualidad hay instituciones armadas que no cuentan con planes en desarrollo para investigar y poner en ejecución procesos de desmilitarizado que involucran tecnologías, capacitación y construcción de instalaciones. Tal situación los lleva a mantener procedimientos mecánicos a través de la utilización de herramientas con intervención directa de personas para realizar el desmilitarizado de municiones y explosivos (separación de componentes). Lo anterior, requiere una continua revisión y actualización de todos los procedimientos de manipulación, desarme, traslado y disposición final, tanto de las partes metálicas como de los explosivos y agentes químicos, minimizando al máximo los riesgos acompañado de una política de protección al medioambiente.

4. CONCLUSIONES

Todas las instituciones armadas deben manejar cantidades considerables de municiones, explosivos y UXOs, desde su recepción, almacenamiento, uso y disposición final, responsabilidad que debe tener un proceso definido y ejecutado por personal competente.

El proceso de desmilitarización, por lo general está relacionado a la cantidad de recursos disponibles para materializar proyectos de desmilitarizado y al nivel tecnológico que pueda desarrollar el país.

Al evaluar los recursos disponibles, tecnología y personal competente se pueden definir los procesos de desmilitarización, basados en las diferentes técnicas descritas en este artículo desde las convencionales, como son la separación de componentes, destrucción de explosivos e incineración de propelentes.

De acuerdo al desarrollo tecnológico y la asignación de recursos económicos que se disponga se pueden implementar otras técnicas de desmilitarización de mayor complejidad como son las técnicas de oxidación, pirolisis y biodegradación.

La diferencia entre las técnicas convencionales y las otras técnicas de desmilitarización radican, en rasgos generales, en el nivel tecnológico, la seguridad y la disponibilidad de recursos para su implementación, siendo de mayor nivel e implicando destinar



mayor cantidad de recursos para las otras técnicas; (técnicas de oxidación, pirolisis y biodegradación).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Archivo Planta de Pólvora y Desmilitarizado de FAMA, Santiago, marzo 2013.
- [2] Presentación EXPAL SYSTEM, España, junio 2015.
- [3] Presentación NAMMO, Noruega, diciembre 2014.
- [4] Manual Organización para la Seguridad y Cooperación en Europa, Ed. 2008 (OSCE).

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**OPERACIÓN DE SISTEMAS DE RADAR DE VIGILANCIA
DE CAMPO DE BATALLA BAJO CONDICIONES DE
CAMANCHACA**



OPERACIÓN DE SISTEMAS DE RADAR DE VIGILANCIA DE CAMPO DE BATALLA BAJO CONDICIONES DE CAMANCHACA

MAY. (IPM) Juan La Rivera Rentería.¹

Resumen: *En el campo de batalla moderno uno de los principios importantes es la sorpresa, adelantándose a las acciones del adversario. Para tal efecto, es que existen sistemas de Comunicaciones, Mando, Control e Inteligencia (C3I, por sus siglas en inglés), que integran una variedad de información que se encuentra disponible para el comandante en tiempo real. Una de las fuentes de información que alimentan con datos estos sistemas son los radares de vigilancia del campo de batalla. Un posible escenario que podría presentarse durante el empleo táctico de radares de vigilancia del campo de batalla, sería el emplazamiento de este tipo de sistemas donde la geografía genere las condiciones adecuadas para tener nieblas con una densidad tal que afecte el normal funcionamiento de estos sensores con respecto a la amenaza que busca detectar. A la luz de lo anterior, y debido a que en el país existen publicaciones científicas del fenómeno llamado “camanchaca”, la que se ha caracterizado por afectar a diversos sistemas tales como enlaces microondas, comunicaciones VHF, entre otros, es que nace la necesidad de estudiar este fenómeno y brindar una herramienta sencilla al comandante, que le permita resolver mejor respecto al empleo de sus medios. Finalmente, se busca estudiar rigurosamente la influencia de la camanchaca en sistemas electrónicos, en especial en sistemas de radares en el norte del país y determinar su efecto en términos de rendimiento.*

Palabras claves: *Radar, camanchaca, planificación, atenuación electromagnética, visibilidad.*

Abstract: *In the modern battlefield one of the most important principles is the surprise and anticipates to the adversary actions. It is for that reason that the Communications, Command, Control and Intelligence systems (C3I, for its acronym in English), which integrates a variety of*

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Electrónica. Msc. PUC



information that is available to the Commander in real time. One source of information that feeds data for these systems, are the battlefield surveillance radars. If we consider possible scenario where the tactic use of battlefield surveillance radars could be affected due atmospheric conditions like mist with a density enough to affect the normal performance of that system. So it is looking closely study the influence of the Camanchaca in electronic systems, particularly radar systems in the North of the country and determines its effect in terms of performance.

Key words: Radar, camanchaca, planning, electromagnetic attenuation, visibility.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales sensores utilizados en el campo de batalla para la obtención de información en los sistemas de Comando, Comunicaciones, Control e Inteligencia (C3I), son los sistemas de radar en general, en especial los de campo de batalla que brindan información sobre movimientos de personas y vehículos tanto aéreos como terrestres. Estos son utilizados normalmente para el control y vigilancia de pasos, instalaciones, explanadas y otros sectores de gran tamaño con una reducida cantidad de medios humanos.

Debido a lo anterior, es de suma importancia conocer, para la fuerza terrestre, las verdaderas capacidades y limitaciones de estos sistemas, en especial en zonas donde las condiciones meteorológicas y climatológicas varían mucho dentro de un mismo día, como por ejemplo, cuando se produce la camanchaca en el norte del país.

A la fecha existen diversos antecedentes donde se exponen situaciones en sistemas de radar que trabajan en la banda "X" (8 a 12 GHz) viendo afectado su desempeño debido a situaciones extremas de niebla o neblina, como lo experimentado en sistemas de radar emplazados en la bahía de Delaware (EE.UU.) [2] donde se verificó, por los prácticos M. Linton, P. Ives y W. Lowe de la de la Pilot Association, que el rango de detección del radar variaba de los 37 a 17 km, o incluso menos al momento de existir neblina extremadamente densa.

Por otro lado, se encuentran documentados con mayor frecuencia problemas referidos al área de las telecomunicaciones, como por ejemplo, casos en enlaces microondas en condiciones semidesérticas en la India [3] o en Lituania [9], que son zonas donde se presentan fenómenos similares a la neblina y que están fuera de las consideraciones técnicas estándar junto con características similares a la camanchaca chilena.



Para lo anterior, en el ámbito de las comunicaciones la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [10] tiene recomendaciones técnicas específicas como la UIT-R P.840-5 para casos de atenuación debido a nubes y niebla. Otros investigadores [1] establecen a base de una función entre longitud de onda, atenuaciones y temperatura una corrección que permite agregar estas pérdidas a los cálculos de enlace. Por otro lado, [4] plantea un modelo de propagación de ondas electromagnéticas en la tropósfera utilizando ecuaciones parabólicas.

Cabe destacar que todos los métodos anteriormente nombrados utilizan como parámetro principal el contenido líquido del medio o Liquid Water Content (LWC) por sus siglas en inglés, el que caracteriza, en términos la cantidad de agua, distribución volumétrica y tamaño de las gotas en suspensión en la neblina.

Si bien existen técnicas que permiten aminorar el efecto de este tipo de fenómenos atmosféricos, como lo son los cambios de polaridad en las antenas, uso de radares digitales, mejora en las etapas de proceso de señales, estas últimas son válidas en su mayoría para sistemas de gran envergadura y no aplicables a sistemas sencillos y altamente transportables como los radares de campo de batalla en general.

Por otro lado las investigaciones referidas al problema que afecta a sistemas de radares militares en otros países, con un mayor desarrollo y maduración de este tipo de tecnologías, son con características secretas o acceso restringido.

En otro ámbito, el Centro del Desierto de Atacama de la Pontificia Universidad Católica de Chile, que dentro de sus objetivos principales tiene como misión *“Ser una plataforma interdisciplinaria para desarrollar ciencia y tecnología aplicada en las zonas áridas y semiáridas de Chile”*, es el lugar que cuenta con la mayor cantidad de información científica formal respecto a las zonas desérticas en Chile, reconocido internacionalmente.

Debido a lo anterior, y como polo de desarrollo y conocimiento en este ámbito es donde se produce la mayor cantidad de publicaciones y conocimiento formal referido a la neblina y camanchaca en el país. Por este motivo existe una gran cantidad de información estadística e histórica sobre la acumulación de agua por atrapanieblas y el LWC en esas zonas.

2. DESARROLLO

2.1. Pérdidas por condiciones atmosféricas

La atenuación de las señales de radar debido a absorción en la tropósfera se pensaba que no era importante bajo los 10 GHz. Como sea, cálculos realizados subsecuente-



mente indican que a frecuencias de tan solo algunos pocos mega Hertz, una significativa absorción puede ocurrir debido a propagaciones a través de largas distancias en la troposfera. Por ejemplo, este fenómeno podría suceder al realizar búsquedas sobre el Campo de Batalla con bajos ángulos de elevación. [8]

En la figura N° 1, se muestran las pérdidas por absorción para el caso de la señal desde y hacia el blanco, a diferentes ángulos de elevación. Lo anterior y más importante, tal como lo hace presente Skolnik en su libro “Radar Handbook”, es que se considera un contenido agua presente de $7,5 \text{ g/m}^3$, para los datos del siguiente gráfico.

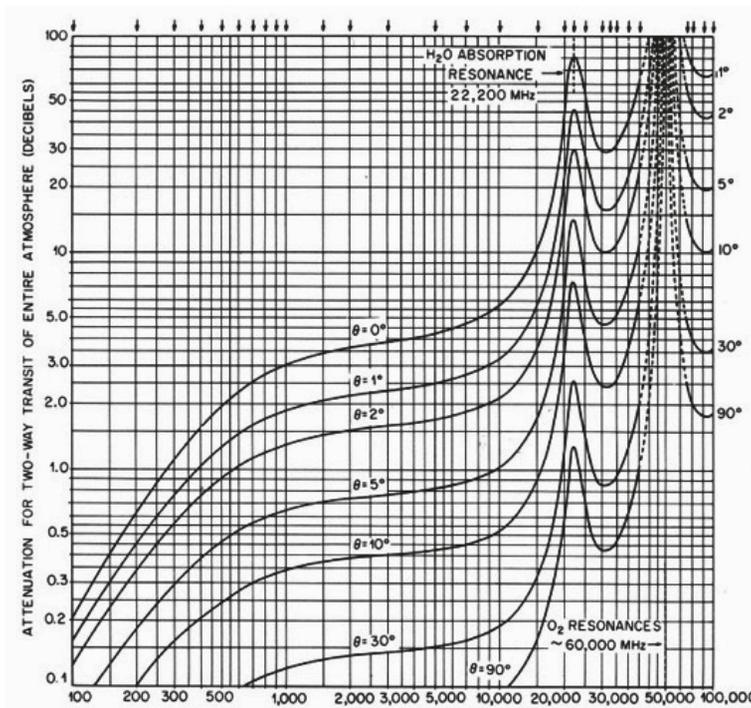


Figura N° 1: Pérdidas producto de condiciones atmosféricas.

Fuente: Skolnik, Merrill. Radar Handbook. (1970).

2.2. Relación entre visibilidad y densidad de la niebla

En primera instancia, es factible definir el concepto de visibilidad como “La distancia máxima a la que pueda verse y reconocerse un objeto de color negro de dimensiones convenientes, situado cerca del suelo, al ser observado ante un fondo brillante”. [11]

La atenuación debida a la niebla se puede expresar en términos de su contenido de agua M , y la microestructura de la niebla puede ser ignorado. [6] En la fórmula



empírica [1] para la visibilidad de niebla como una función de densidad de la niebla se tiene que:

$$V = 0,024M^{-0,65}$$

Donde:

V : Visibilidad en [km]

M : Contenido de agua líquida en [g /m³]

Se mencionó que la fórmula anterior es válida para el diámetro de gota entre 0,3 y 10 micras. Para el caso de niebla densa u otros tipos de niebla, el autor recomienda reemplazar el coeficiente 0,024 a 0,017 (adimensional) para nieblas de radiación y advección, respectivamente. Si se dispone de los datos de visibilidad, pero los datos de densidad de la niebla no están disponibles, la siguiente expresión puede ser utilizada:

$$M = \left(\frac{0,024}{V}\right)^{1,54}$$

Donde:

V : Visibilidad en [km]

M : Contenido de agua líquida en [g /m³]

2.3. Relación entre LWC y visibilidad

Se señala que la atenuación debida a la niebla usualmente es determinada, en primera instancia, obteniendo el índice de refracción del agua para una temperatura y longitud de onda determinada, para luego, utilizando una aproximación por Rayleigh, proceder a calcular la atenuación.

Las gotas raramente tienen diámetros mayores a 0,1 mm, por lo tanto la aproximación de Rayleigh es válida esencialmente en las longitudes de ondas milimétricas. Para esas longitudes de onda, las pérdidas por *escattering* son insignificantes, por lo que el tamaño de la gota no es relevante, pero sí su densidad. [1]

En el año 2011, en la Conferencia Internacional de Telecomunicaciones efectuada en Graz, Austria, se presentó una investigación, donde a través de un estudio que analizó 5 meses de información sobre LWC, visibilidad y atenuación óptica medidas simultáneamente, [7] lo que permitió validar el modelo presentado en 1966 sobre la relación entre el líquido en suspensión y las atenuaciones ópticas. [5]



Debido a lo anterior, se pudo obtener y validar la siguiente relación:

$$V = b(LWC)^{-2/3}$$

Donde :

V : visibilidad en [km]

LWC : contenido de agua líquida en [g /m³]

b : se define de acuerdo a la Tabla 1:

TIPO DE NIEBLA	b
Dense fog	0.013
Continental fog	0.034
Maritime fog (wet and warm)	0.060
Dense Haze and selective fog	0.017
Stable and evolving fog	0.024
Advection fog	0.02381

Tabla 1: Valores para constante b según tipo de niebla.

2.4. Relación entre LWC y atenuación electromagnética

A continuación se presenta la metodología propuesta por la ITU para relacionar el LWC y la atenuación. Para lo anterior, es factible definir que la atenuación específica puede ser descrita como:

$$\gamma_c = K_i LWC \text{ [dB/km]}$$

Donde:

γ_c : Atenuación específica (dB/km)

LWC : Contenido de agua líquida en [g /m³]

K_i : Coeficiente de atenuación ((dB/km)/(g/m³))

El modelo matemático utilizado está basado en Rayleigh, el que se vale del modelo de Debye para la permitividad dieléctrica $\epsilon(f)$ de agua, la cual puede ser utilizada para calcular el valor de K_i , para frecuencia hasta 1.000 GHz.



$$K_l = \frac{0.819 f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \left[\frac{\text{dB}}{\frac{\text{km}}{\frac{\text{g}}{\text{m}^3}}} \right]$$

Donde:

f : Frecuencia en GHz

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua está dada por:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p(1 + (f/f_p)^2)} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s(1 + (f/f_s)^2)}$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + (f/f_p)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + (f/f_s)^2} + \varepsilon_2$$

Luego,

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1)$$

$$\varepsilon_1 = 5.48$$

$$\varepsilon_2 = 3.51$$

$$\theta = 300/T$$

Donde:

T : Temperatura en grados Kelvin

En cuanto a las frecuencias de relajación primaria (f_p) y secundaria (f_s), se definen como:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1)$$

A continuación, en figura N° 2, se presenta un gráfico extraído desde la recomendación técnica, donde se puede apreciar la atenuación específica a distintas frecuencias, dependiente de la cantidad de densidad volumétrica del agua en suspensión a distintas temperaturas.

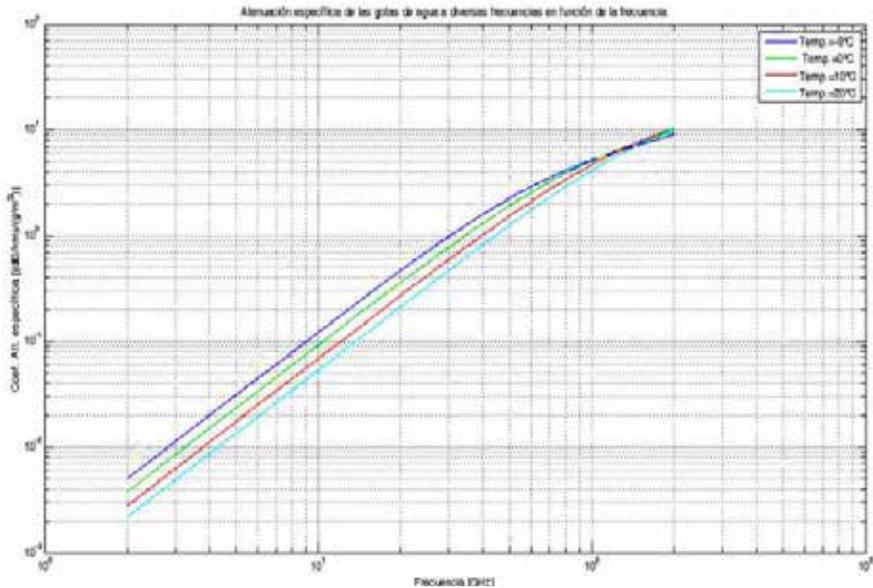


Figura N° 2: Atenuación de gotas de agua a diversas frecuencias.
Fuente: Skolnik, Merrill. Radar Handbook. (1970).

2.5. Relación entre atenuación electromagnética y visibilidad

Continuando con el desarrollo de este artículo, el siguiente paso es establecer la relación entre la atenuación electromagnética y la visibilidad. Para esto se utilizaron los modelos propuestos por la recomendación ITU-R P.840-5 [10] y el método validado. [7]

Es por lo anterior, que al considerar la ecuación entregada por la UIT y despejar LWC, queda,

$$LWC = \left(\frac{V}{b}\right)^{-3/2} \quad [g/m^3]$$

El resultado anterior es posible de reemplazar, obteniéndose,

$$\gamma_c = K_l \cdot LWC \quad [dB/km]$$

Considerando que K_l , es función de la temperatura y la frecuencia.

A continuación, en figura N° 3, se presenta un gráfico donde se puede apreciar el comportamiento de la atenuación en relación a la visibilidad y los distintos tipos de nieblas definidas en el modelo, denotadas por el valor de b , de acuerdo a Tabla 1.

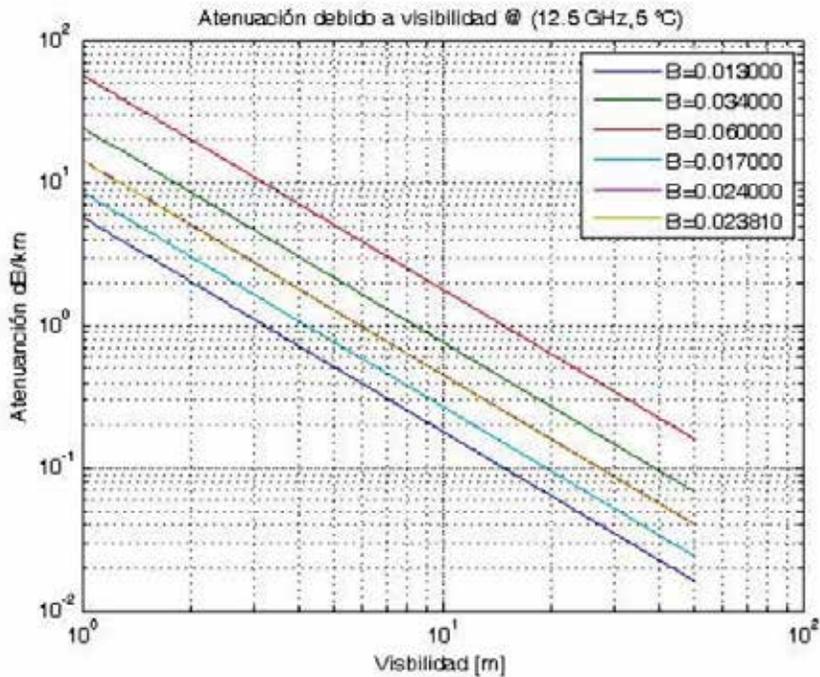


Figura Nº 3: Atenuación debido a visibilidad.

Fuente: Skolnik, Merrill. Radar Handbook. (1970).

2.6. Relación señal ruido y mínima señal discernible

Al considerar la siguiente ecuación que determina la potencia recibida por la antena receptora del radar, se aprecia que no están consideradas las pérdidas de ningún tipo, ya sea de,

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} \cdot \sigma \cdot A_e^2}{4\pi \cdot R^4 \lambda^2} \quad [W]$$

En la ecuación anterior, no se encuentran consideradas los distintos tipos de pérdidas, tales como las de transmisión, recepción, absorción o propagación, condiciones atmosféricas, entre otras donde mediante la letra L, se engloba a todas las pérdidas que se pudieran considerar. Por lo tanto, al agregar las pérdidas de la ecuación anterior, queda de la forma,

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} \cdot \sigma \cdot A_e^2}{4\pi \cdot R^4 \lambda^2 L} \quad [W]$$

La SNR que se define a continuación, junto con la ecuación anterior se puede reescribir en términos de la ganancia considerada, quedando:



$$SNR = \frac{P_{rx}}{N} = \frac{P_{tx} G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 NL}$$

Donde:

P_{rx} : Potencia recibida

P_{tx} : Potencia Transmitida

G : Ganancia de la antena considerando que es monoestático

λ : Longitud de onda

R : Rango del radar

L : Representa a la totalidad de las pérdidas

N : Ruido tanto interno como externo

2.7. SNR en función de la visibilidad

Luego, al evaluar la ecuación de SNR anteriormente definida a la distancia de rango máximo (R_{max}), pero considerando las pérdidas asociadas y suponiendo que se quiere conocer el nivel de SNR a esa distancia en distintas condiciones de visibilidad.

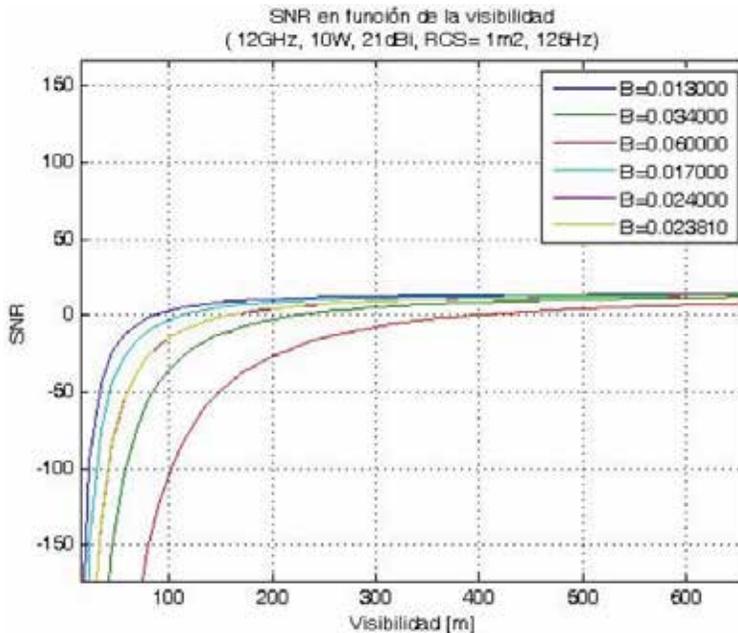


Figura Nº 4: SNR en función de la visibilidad.

Fuente: Skolnik, Merrill. Radar Handbook. (1970).



2.8. Rendimiento de los sistemas de radar de campo de batalla bajo condiciones de camanchaca

Como una forma de hacer un análisis de sensibilidad a través de métodos numéricos se utilizó la ecuación,

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 N L (SNR)_{min}}}$$

En la cual se iteró para distintas condiciones de visibilidad un rango tal que cumpla con la condición de que el SNR fuera igual o mayor al umbral de la mínima señal discernible y pueda detectar un blanco en forma satisfactoria dada por el fabricante, considerando las condiciones de camanchaca. De esta forma se puede apreciar la capacidad de detectar un mismo blanco en distintas condiciones.

A continuación, en Tabla 2, se aprecia el resultado de la aplicación de este modelo de un radar ficticio definido como:

SUBSISTEMA	PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Radar	Frecuencia	12	GHz
	Potencia de TX	10	Watts
	Ganancia Antena	21	dBi
	Ancho de banda	125	Hz
	Figura de ruido	33	dB
	SNR	15	dB
	Temperatura	290	Kelvin
Objetivo	Sección Cruzada de radar	1	m ²
Constantes	Boltzmann	1.38e-23	J/K

Tabla 2: Valores de la aplicación de modelo de un radar ficticio.

Siendo los resultados obtenidos como sigue, para el radar ficticio definido anteriormente.

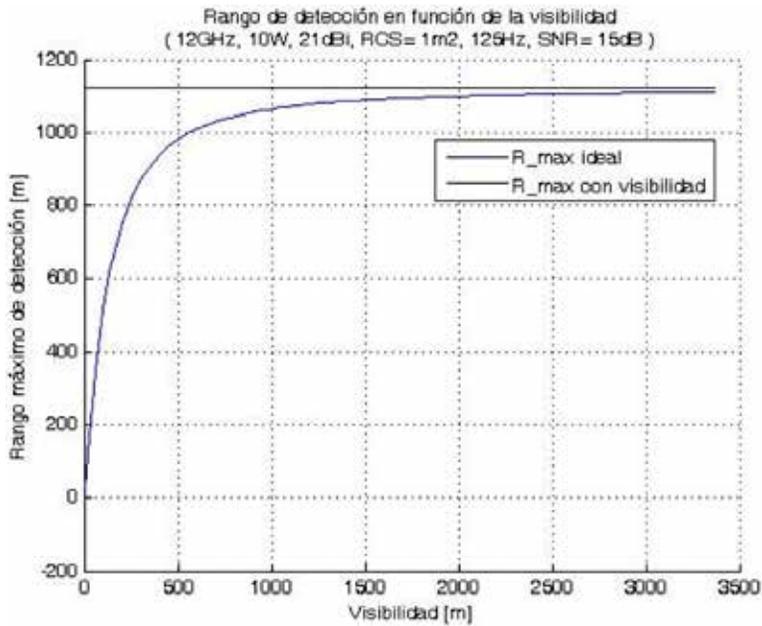


Figura N° 5: Rango de detección en función de la visibilidad.

Al graficar solo la visibilidad que está en el rango menor a 500 m, que es una visibilidad altamente probable de encontrar cuando se produce el fenómeno de camanchaca, se puede observar lo siguiente:

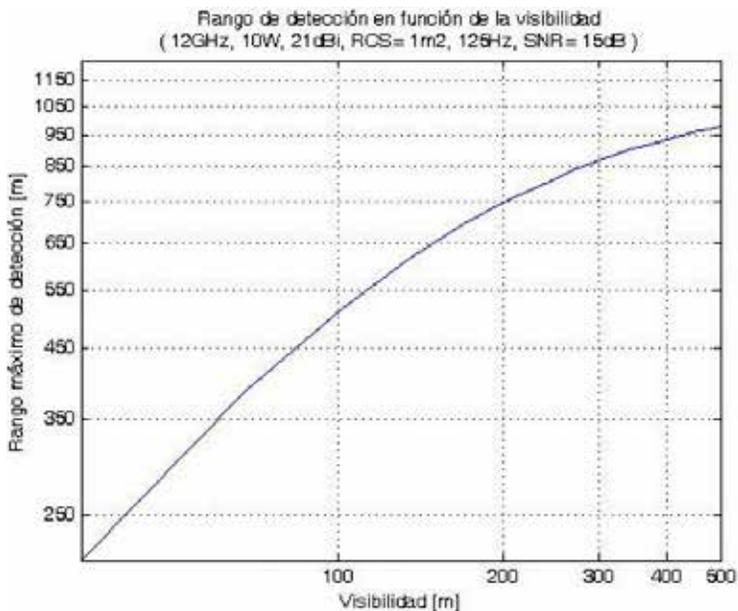


Figura N° 6: Rango de detección en función de la visibilidad en el rango menor a 500 m.



Por lo tanto desde un punto de vista teórico, sí es importante considerar la camanchaca en la planificación del comandante. Ya que se aprecia claramente la disminución de la eficiencia del sistema a medida que baja la visibilidad.

3. CONCLUSIONES

Se pudo verificar que el comportamiento de la camanchaca es factible de prever y que en general se presenta en lugares de alto interés táctico, tales como quebradas o riscos cercanos a la costa que son elegidos frecuentemente para la vigilancia de sectores costeros.

Luego de haber interrelacionado investigaciones, conocimiento, publicaciones, metodologías y otros, de áreas tan diversas como la geografía, meteorología, métodos numéricos, telecomunicaciones, se pudo establecer un método de trabajo que pudo entregar los resultados planteados.

La hipótesis se confirmó; la camanchaca sí disminuye el rango de detección de los sistemas de radar. Por ejemplo en visibilidades bajo los 200 m, situación que ocurre frecuentemente en el norte del país, la capacidad de detección puede bajar hasta el 20% o menos, analizar la figura N° 12-3. Tal como el caso del radar de la bahía de Delaware (Brookner, Ferraro, & Ouder Kirk, 1998).

Se confirma que a través de las especificaciones técnicas de un radar, se puede obtener su comportamiento teórico frente a situaciones de camanchaca.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALTSHULER, Edward E. (1984). *A simple expression for estimating attenuation by fog at millimeter wavelengths.*
- [2] BROOKNER, Eli; FERRARO, Ellen AND OUDERKIRK, Gregg D. (1998). *Radar performance during propagation fades in the mid-Atlantic region.*
- [3] CHAUDHARY, Naveen Kumar; TRIVEDI, DK AND GUPTA, Roopam (2011). *International journal of latest trends in computing.*
- [4] DOCKERY, Daniel G. (1988). *Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using parabolic equation.*
- [5] ELDRIDGE, Ralph G. (1966). Haze and fog aerosol distributions. *Journal of the atmospheric sciences.*



- [6] GALATI, G. (2006). Fog detection using airport radar.
- [7] KHAN, M. S. (2011). Validating Relationship between Aerosol's Liquid Water Content and Optical Attenuation for Terrestrial FSO links.
- [8] SKOLNIK, Merrill (1970). *Radar Handbook*. New York : McGraw Hill Book Company.
- [9] TAMOSIUNAS, S. (2009). *The influence of fog on the propagation of the electromagnetic waves under lithuanian climate conditions*.
- [10] International Telecommunication Union (2012). *ITU-R P.840-5, Attenuation due to clouds and fog*.
- [11] Dirección General de Aeronautica Civil (2008). Coordinación entre los servicios de tránsito aéreo (ATS) y los servicios de meteorología aeronáutica (MET). Santiago.

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**MECÁNICA COMPUTACIONAL COMO HERRAMIENTA
PARA EL DISEÑO DE INGENIERÍA DE DEFENSA**



MECÁNICA COMPUTACIONAL COMO HERRAMIENTA PARA EL DISEÑO DE INGENIERÍA DE DEFENSA

TCL. (IPM) Rodrigo Guajardo Santana.¹

Resumen: En los últimos años ha habido una considerable actividad relacionada con las capacidades de diseño asistido por computador (CAD) y de ingeniería asistida por computador (CAE), siendo vital en la industria automotora, petrolera, de energía, de salud, aeroespacial y, en especial, en la industria de defensa y seguridad a nivel mundial. La necesidad de incorporar nuevas tecnologías en sistemas de armas (SAs) para mantener actualizada su capacidad operacional ante una amenaza constantemente cambiante, asegurando a la tripulación su operación en un ambiente seguro, hace indispensable realizar numerosas pruebas que permitan contar con un sistema robusto y confiable. En este sentido, la simulación computacional es una herramienta conveniente y de enorme valor que entrega un instrumento de análisis rápido, de bajo costo y seguro que permite ser utilizado tanto en las fases de diseño de ingeniería y producción, como para la integración de nuevas tecnologías. En el contexto del diseño de ingeniería de Defensa, este artículo expone brevemente una mirada a la mecánica computacional y al cálculo científico, los modelos numéricos de uso más frecuente para el cálculo y solución de fenómenos multifísicos, y al desarrollo de la mecánica computacional como herramienta de validación del proceso de ingeniería de desarrollo. A su vez, se presentan herramientas computacionales de amplio uso en la industria como en la docencia. Finalmente, se destaca un caso con el fin de demostrar la metodología de trabajo para el uso de estas herramientas y revelar sus capacidades para el análisis y resolución de complejos problemas de ingeniería.

Palabras claves: Diseño asistido por computador, ingeniería asistida por computador, simulación computacional, diseño de ingeniería de defensa, mecánica computacional.

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Mecánica. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Mecánica - USACH.



Abstract: *In the past years, there has been considerable activity regarding the current computer-aided design (CAD) and computer-aided engineering (CAE), which has proven to be vital in automotive, oil, energy, health, aerospace and especially in defense and security industry worldwide. The need to incorporate new technologies in weapons systems, and to keep updated its operational capability against a constantly changing threat by ensuring its crew to operate in a safe environment, extensive testing is necessary to develop a robust and create a reliable system. In this regard, the computational simulation phase, is a very useful and an invaluable tool that provides a quick analysis, low cost and safety that allows it to be used in both phases of engineering design and manufacturing, as well as for the integration of new technologies. In the context of Design Engineering for Defense, this article outlines a brief glance at the computational mechanics, scientific computing, numerical models which more frequently used for calculating and solving multiphysics phenomena. We must also know that computational mechanics development is to be used as a tool for engineering the development process validation. At the same time the computational tools have been widely used in academic and industrial purposes as well. Finally, a case of use has been presented. This has been done in order to present the methodology as well as the usage of these tools in order to show their capabilities in analyzing and solving complex engineering problems.*

Key words: *Computer aided design, computer aided engineering, computer simulation, defense engineering design, computational mechanics.*

1. INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA COMPUTACIONAL [2]

El crecimiento en la capacidad de procesamiento computacional, en los últimos cuarenta años, ha sido más que revolucionario. Al mismo tiempo, la modelación y la simulación han encontrado su puerta de entrada en la cultura popular mayormente reconocible en los juegos computacionales (en particular, a través de la generación de animaciones y escenarios virtuales). Esto está tan asumido por los consumidores de estos productos que hay mucho más interés en el empleo de escenarios para juegos que en la misma producción de modelos y simulaciones.

En el mundo profesional de la ingeniería, la modelación computacional ha permitido una aproximación radical al diseño de ingeniería aplicada al desarrollo de productos, utilizando los prototipos digitales y la simulación dinámica. Sistemas completos pueden ser representados a través de pequeños computadores, entregando las

bases para un extenso análisis y experimentación, tal como se ejemplifica en la figura N° 1. Gradualmente, la industria ha cambiado su aproximación a esta multidisciplinaria, mediante un proceso de desarrollo integrado, sustentado en bases de datos y herramientas de diseño.

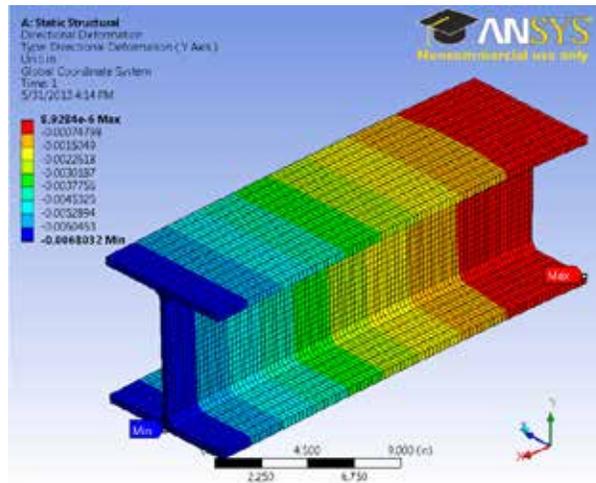


Figura N° 1: Cornell University. Análisis estructural de una viga en voladizo.

Fuente: <http://confluence.cornell.edu>

El modelamiento computacional es una actividad crecientemente importante en el desarrollo de nuevos sistemas, sobre todo en SAs. Su importancia refleja el crecimiento en sistemas complejos, así como el énfasis en la integración e interoperabilidad. Esta aproximación puede abarcar virtualmente cada aspecto del comportamiento del sistema dentro de un entorno operacional. La filosofía es la de aplicar modelos matemáticos y ciencias relevantes con el fin de construir sistemas sintetizados, los que son expresados como ecuaciones y algoritmos en conjunto soportados por datos relevantes. Estos pueden ser trabajados dentro de un computador con el propósito de análisis, optimización, simulación y visualización.

El término “sistema” en general, aplica a una formación o red de componentes que realizan funciones integradas y exhiben un comportamiento dinámico. Por definición, un componente es visto como la unidad básica en la descomposición de un sistema en particular y, como tal, es tratado como indivisible. Los componentes son ensamblados para formar un sistema y los sistemas pueden ser ensamblados en sistemas más grandes; por ejemplo, los sistemas de sistemas. Los límites y divisiones pueden ser extraídos de cualquier lugar que tenga sentido en relación con el contexto de lo que un sistema está destinado a hacer y cómo está organizado, tal como se ejemplifica en la figura N° 2.

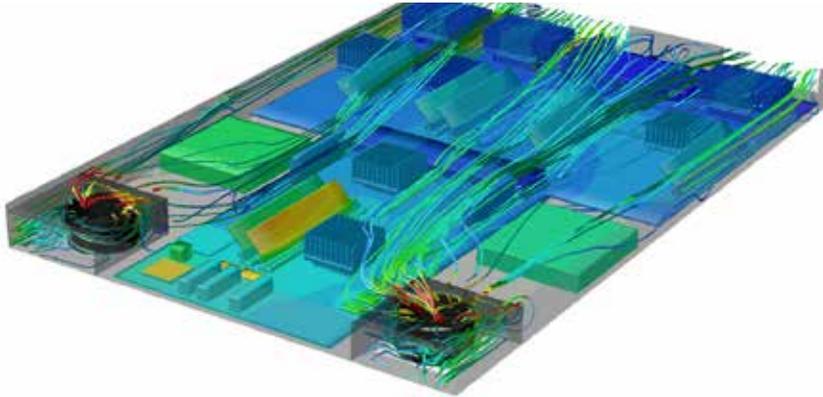


Figura N° 2: Wildeanalysis. Análisis térmico de componentes electrónicos.

Fuente: <http://wildeanalysis.co.uk/>

La representación de los sistemas, comúnmente llamados “modelos”, y se le puede dar cualquier forma o contenido que sea relevante para un propósito específico. Los modelos computacionales están basados en ecuaciones constitutivas y relaciones que describen la interconexión de los componentes de un sistema y la interdependencia de los parámetros del sistema. Lo que contiene un modelo está dictado por lo que el modelo está destinado a hacer y cómo va a ser empleado. El nivel de detalle establece la capacidad del modelo completo y, por último, trata de ser una réplica de un sistema real, como se ilustra en la figura N° 3.

La escala y complejidad de los sistemas pueden variar considerablemente, al igual que la capacidad para el procesamiento de información. La mayor parte de los sistemas involucra algún nivel de interacción humana, de tal manera que los seres humanos se transforman en parte del sistema cuando están en uso.

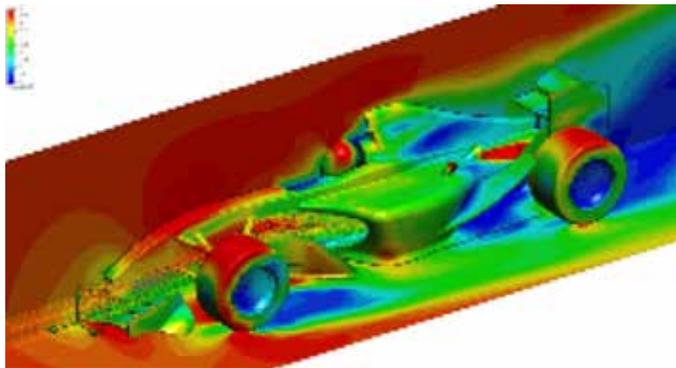


Figura N° 3: Mentor Graphics. Optimización aerodinámica de diseño de un vehículo F1.

Fuente: <http://blogs.mentor.com>



Todos los sistemas tienen un entorno externo que define el alcance del espacio operacional y la variabilidad de parámetros operacionales. A menudo es apropiado pensar en muchos entornos coexistiendo en el mismo espacio operacional, cada uno apoyando un modo diferente de operación (por ejemplo, transferencia de información, transferencia de calor). De este modo, dentro de todos los entornos prescritos, un sistema debe operar bajo condiciones ambientales y a su vez, interoperar con otros sistemas y dispositivos. Esto implica un entorno de “mundo real” (donde se realiza el contacto físico y geofísico) con la coexistencia de un entorno de red (donde se lleva a cabo un intercambio de información), como se ejemplifica en la figura N° 4. De este modo, un sistema puede ser casi cualquier estructura u organización, entregado como un ensamble de partes o componentes, que realizan un objetivo y que exhiben un comportamiento temporal (varía en función del tiempo). En términos más sencillos, la modelación computacional normalmente se realiza con uno o más de los siguientes objetivos:

- Confirmar el concepto de la operación de un sistema.
- Comprender los mecanismos funcionales propios del sistema.
- Predecir el comportamiento del sistema.
- Investigar incertidumbres paramétricas y restricciones físicas.
- Ejecutar control y monitoreo de funciones.
- Proponer y refinar los requerimientos del diseño.
- Verificar y validar un diseño o integración.
- Evaluar aspectos de seguridad e interoperabilidad.

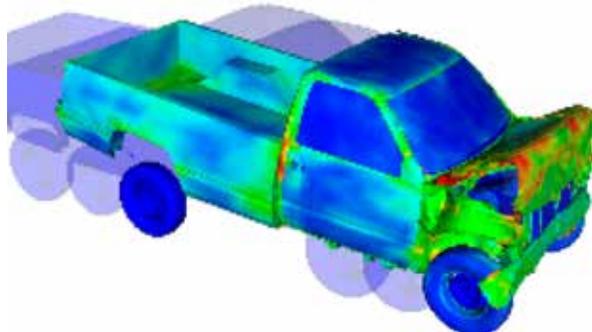


Figura N° 4: MSC Software. Estudio de impacto para análisis de deformación programada en vehículos.

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

La modelación computacional se ha transformado en una amplia y variada multidisciplina, con el potencial para la consolidación de modelos multiplataformas, multisistemas, multifísicos y simulaciones para evaluaciones funcionales y operacionales. Estos pueden ser realizados en un solo computador o en una red de computadores. La participación en esta actividad puede extenderse a un gran número de personas, como desarrolladores,



usuarios u observadores. De esta forma, es apropiado que los principios técnicos sean explorados como una exposición multidisciplinaria, de tal manera que los participantes puedan apreciar las diversas contribuciones desde la ciencia y la ingeniería. La difusión de esta actividad es el principal objetivo que tiene este artículo para que los lectores puedan conocer y profundizar en el uso y en las potencialidades que esta herramienta entrega en el proceso del diseño de ingeniería de defensa.

2. CÁLCULO CIENTÍFICO Y TÉCNICAS NUMÉRICAS PARA LA RESOLUCIÓN DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES (EDPS)

2.1. Cálculo científico

El análisis numérico tiene relación con el diseño y análisis de algoritmos para la resolución de problemas matemáticos que surgen en muchos campos, especialmente en las ciencias y en la ingeniería. Por esta razón, el análisis numérico recientemente ha sido también llamado cálculo científico (*scientific computing*). El cálculo científico se diferencia mayormente de las otras ramas de las ciencias informáticas en que las cantidades son continuas, en contraposición a las discretas. Su principal interés son las funciones y ecuaciones, cuyas variables subyacentes: tiempo, distancia, velocidad, temperatura, densidad, presión, esfuerzos y similares, son continuas en la naturaleza.

La mayoría de los problemas de las matemáticas del continuo (por ejemplo, problemas que involucren derivadas, integrales o no linealidades) no pueden ser resueltos, y deben ser solucionados mediante un (teóricamente infinito) proceso iterativo que, finalmente, converge a una solución. En la práctica no se itera de manera ilimitada, en efecto, solo hasta que el resultado es aproximadamente correcto, “lo suficientemente cercano” al resultado deseado de acuerdo con el propósito práctico del fenómeno físico por analizar. De este modo, uno de los aspectos más importantes del cálculo científico es encontrar algoritmos iterativos rápidamente convergentes y evaluar la precisión de la aproximación resultante. Si la convergencia es lo suficientemente rápida, incluso algunos de los problemas pueden ser resueltos mediante algoritmos finitos, como sistemas de ecuaciones algebraicas lineales.

Un segundo factor que diferencia al cálculo científico tiene relación con el efecto de las aproximaciones. Muchas técnicas de solución implican una completa serie de aproximaciones de varios tipos; incluso la aritmética utilizada es solo aproximada. Para los computadores digitales no es posible representar todos los números reales en forma exacta. Adicionalmente, al poseer las propiedades requeridas y contar con buenos algoritmos, como medida de eficiencia, los algoritmos numéricos también deben ser confiables y precisos.



2.2. Técnicas numéricas para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales (EDPs) [5]

Hay tres pasos importantes en la modelación computacional de cualquier proceso físico: la definición del problema, el modelo matemático, y la simulación computacional.

El primer paso natural es definir una idealización del problema de interés en términos de un conjunto de cantidades relevantes que habría que medir. En la definición de esta idealización, se espera obtener una aproximación fidedigna, esto es uno que tiene una solución única para un conjunto dado de parámetros. No siempre podría ser posible garantizar la fidelidad de la idealización, ya que, en algunos casos, el proceso físico no está totalmente entendido. Un ejemplo es el entorno complejo de un arma al momento del disparo, donde la obtención de mediciones se dificulta al no contar con instrumentación especializada.

El segundo paso del proceso de modelado es representar nuestra idealización de la realidad física mediante un modelo matemático: las ecuaciones gobernantes del problema, las que están disponibles para muchos fenómenos físicos. Por ejemplo en la dinámica de fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes se consideran como una representación exacta del movimiento del fluido. Análogamente, las ecuaciones de la elasticidad en la mecánica estructural gobiernan la deformación de un objeto sólido debido a las fuerzas externas aplicadas. Estas son ecuaciones generales complejas que son muy difíciles de resolver analítica y computacionalmente. Por lo tanto, es necesario introducir supuestos simplificados para reducir la complejidad del modelo matemático y que sea susceptible de cualquiera de las soluciones exactas o numéricas. Por ejemplo, el flujo irrotacional (sin vorticidad) de un fluido incompresible está representado con precisión por las ecuaciones de Navier-Stokes (figura N° 5). Pero si los efectos de la viscosidad del fluido son pequeños, entonces la ecuación de flujo potencial de Laplace es una descripción mucho más eficiente del problema.

Después de la selección de un modelo matemático adecuado, junto con los límites apropiados y las condiciones iniciales, se puede proceder a su solución. En este artículo solo se va a considerar la solución numérica de problemas matemáticos que se describen por ecuaciones diferenciales parciales (EDP).

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f}$$

Figura N° 5: Ecuación de Navier-Stokes.



Las tres opciones clásicas para la solución numérica de EDPs son el método de diferencias finitas (MDF), el método de elementos finitos (MEF, ver ejemplo de la figura N° 6) y el método de volúmenes finitos (MVF). El MDF es el más antiguo y se basa en la aplicación de una expansión de Taylor local para aproximar las ecuaciones diferenciales. El MDF utiliza una red topológicamente cuadrada de líneas para la construcción de la discretización de las EDP. Este es un “cuello de botella” potencial del método, cuando se deben manipular geometrías complejas en múltiples dimensiones. Este problema ha motivado el uso de una forma integral de las EDPs y, posteriormente, el desarrollo del elemento finito y técnicas de volúmenes finitos.

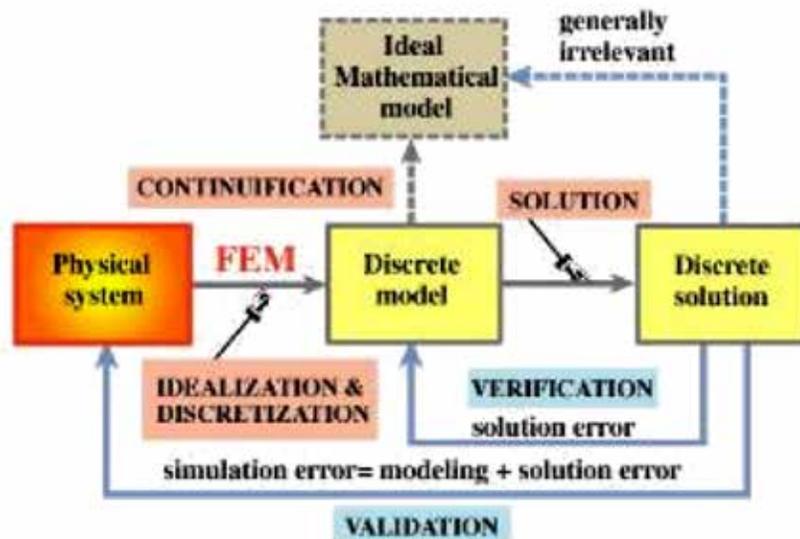


Figura N° 6: University of Colorado. Vista simplificada del proceso de simulación física mediante MEF

Fuente: <http://www.colorado.edu>

3. HERRAMIENTAS DE CÁLCULO COMPUTACIONAL (CAD/CAE). [1, 3 Y 4]

Una vez que el diseño conceptual ha sido desarrollado, el subproceso de análisis de ingeniería comienza con el análisis y la optimización del diseño. El modelo de análisis se obtiene removiendo del diseño original los detalles innecesarios, reduciendo dimensiones, y reconociendo y empleando la simetría de los cuerpos. La reducción dimensional, por ejemplo, implica que una lámina delgada de material es representada por una superficie equivalente con un atributo de espesor o una región larga y delgada, se puede representar como una línea a la que se le asignan propiedades de sección transversal. Los cuerpos con simetrías en su geometría y carga, se suelen analizar teniendo en consideración solo una parte del modelo, como se ejemplifica en la figura N° 7.

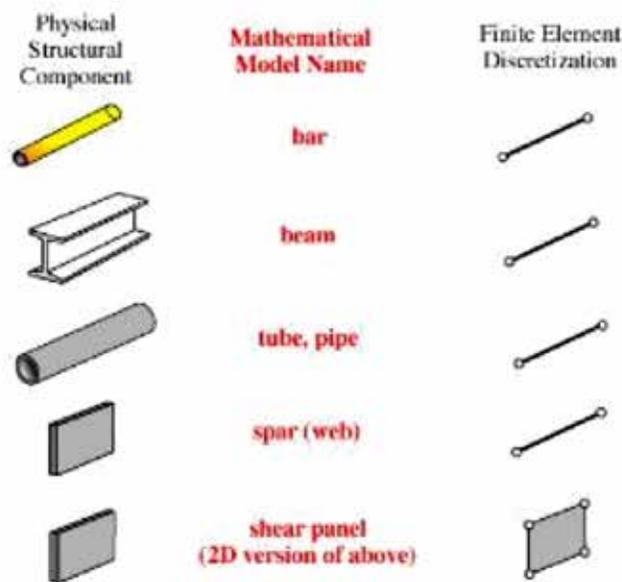


Figura N° 7: University of Colorado. Discretización MEF de componentes estructurales.

Fuente: <http://www.colorado.edu>

Los análisis que se realizan más comúnmente son el de esfuerzo para validar la resistencia del diseño, la revisión de interferencias para detectar colisiones entre los componentes de un ensamble, a medida que estos se están desplazando, y el análisis cinemático para revisar si el sistema entregará los movimientos deseados. La calidad de los resultados obtenidos de estas actividades está directamente relacionada y limitada, a su vez, por la calidad del modelo de análisis elegido.

Una vez que un diseño se ha completado, después de la optimización o alguna decisión de concesión, comienza la fase de evaluación del diseño, el que puede ser construido con prototipos para este propósito.

La nueva tecnología denominada de prototipado rápido se ha vuelto popular para la construcción de prototipos. Esta tecnología se utiliza depositando capas desde la superficie inferior a la última superior, por lo tanto, permite la construcción del prototipo desde su diseño, ya que requiere básicamente la información de la sección transversal del producto. Si la evaluación del diseño en el prototipo indica que el diseño no es satisfactorio, el proceso descrito se repite con un nuevo diseño, cuando el resultado de la evaluación del diseño es satisfactorio, se congela el diseño y se prepara la documentación técnica para su fabricación, lo que incluye la preparación de planos, informes y listas de materiales. Convencionalmente, los planos están hechos a partir de los dibujos y se traspasan a la fabricación.



Dentro de las herramientas comerciales ampliamente utilizadas en apoyo al proceso de análisis de ingeniería, se encuentran los paquetes de software CAD/CAM. CAD es el uso de sistemas computacionales para asistir en la creación, modificación, análisis y optimización del diseño; mejorar la comunicación de información a través de documentación; y crear una base de datos para la manufactura. La salida del CAD es a menudo en forma de archivos electrónicos para imprimir, maquinado u otra operación de manufactura. La ingeniería asistida por computador (CAE) es el uso extensivo de plataformas computacionales para asistir las tareas del análisis de ingeniería. Este último incluye el análisis por elementos finitos (FEA), la dinámica de fluidos computacionales (CFD), la dinámica multicuerpo (MBD) y la optimización.

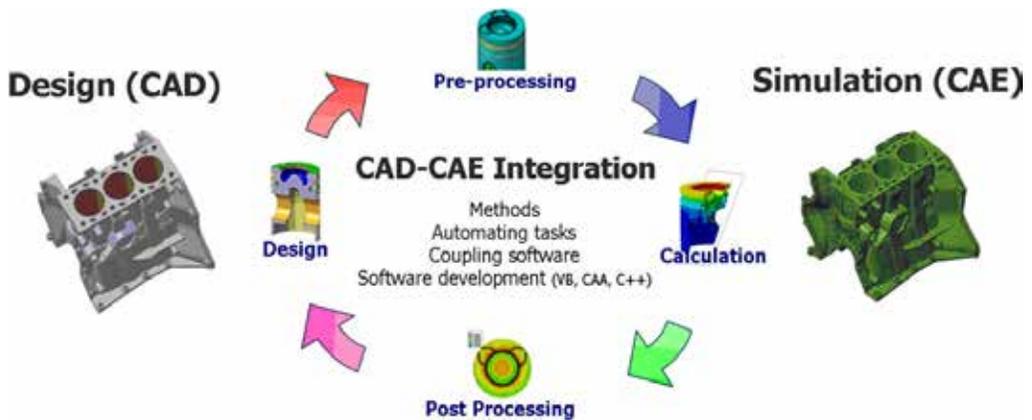


Figura N° 8: University of Colorado. Discretización MEF de componentes estructurales.

Fuente: <http://www.colorado.edu>

Las herramientas de software que han sido desarrolladas para apoyar estas actividades, son consideradas herramientas CAE, las que están siendo utilizadas, por ejemplo, para analizar la robustez y el rendimiento de componentes y ensambles. La ingeniería asistida por computador, es utilizada en muchos campos, entre otros, el automotriz, la aviación, el espacial y la defensa. Algunos de los softwares empleados en la industria y la docencia para el análisis de ingeniería, se resumen en la figura N° 8.

3.1. Solidworks [9]

Solidworks es una herramienta de diseño asistido por computador (CAD) para el modelamiento de sólidos y de ingeniería asistida por computador (CAE) que corre en sistema operativo Windows y que fue desarrollado por Dassault Systèmes. Este software es utilizado ampliamente en la industria en procesos de diseño y fabricación, destacan sus capacidades de (CAD) y sus aplicaciones (CAE), tal como se ilustra en las figuras N° 9 y 10.



Dentro de sus capacidades de análisis de ingeniería se encuentran las siguientes:

- **Análisis de esfuerzos lineales**

Calcula las tensiones y deformaciones de piezas y ensambles, debido a las cargas internas y externas para validar el rendimiento y seguridad del sistema, mientras se realiza el diseño.

- **Análisis de esfuerzos no-lineales**

Analiza las tensiones y deformaciones de geometrías bajo condiciones generales de carga y de material.

- **Análisis de elementos finitos (FEA)**

Utiliza el análisis por medio de elementos finitos (FEA) para calcular las tensiones y desplazamientos de piezas y ensambles bajo cargas internas y externas.

- **Análisis térmico estructural**

Calcula la distribución de temperatura dentro de una estructura sólida, utilizando el FEA.

- **Dinámica de fluidos computacional (CFD)**

Calcula las fuerzas generadas por el flujo de fluidos y transferencia de calor, y analiza el impacto de líquidos o gases en movimiento.

- **Análisis de fatiga**

Analiza el impacto de cargas cíclicas y el proceso de falla estructural de componentes durante su vida operativa.

- **Análisis de frecuencia**

Identifica las condiciones de borde y asegura que los modos de vibración natural estén alejados de las frecuencias operacionales actuadoras (resonancia).

- **Análisis dinámico**

Determina el impacto en la respuesta estructural del sistema ante cargas que varían en el tiempo.



Figura N° 9: Aerospace&Defense Technology. Diseño de sistema de protección de comunicaciones M56E1 US Army.

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

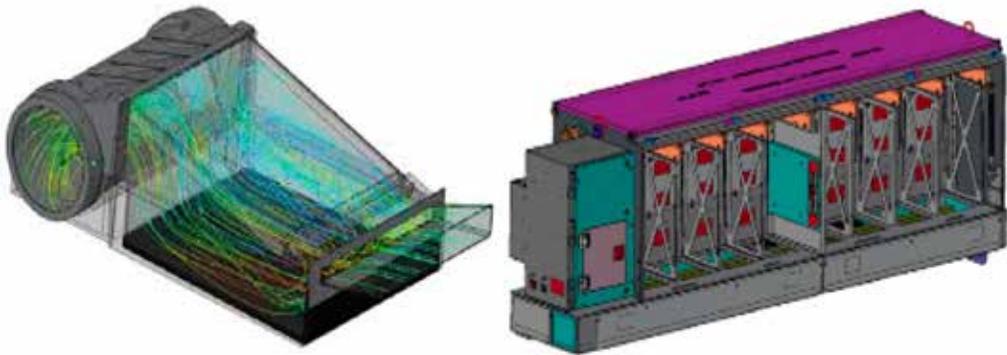


Figura N° 10: Solidworks. Diseño y análisis fluidodinámico para el sistema de emisión del sistema M56E1 US Army.

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

3.2. COMSOL Multiphysics [8]

COMSOL Multiphysics (antes conocido como FEMLAB) es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos, para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente para fenómenos acoplados (utilización simultánea de diferentes métodos de discretización) o multifísicos (resolución simultánea de diferentes problemas físicos; por ejemplo, el caso fluido-estructura).

COMSOL Multiphysics también ofrece una amplia y bien gestionada interfaz a MATLAB y sus toolboxes, que proporcionan una variedad de posibilidades de programación, preproceso y posproceso. Los paquetes son multiplataforma (Windows, Mac, Linux, Unix). Además de las interfaces de usuario convencionales basadas en físicas, COMSOL Multiphysics también permite entrar sistemas acoplados de ecuaciones diferenciales parciales (EDPs). Este software es utilizado ampliamente para la docencia, como también en la industria.



Dentro de sus capacidades de análisis de ingeniería, adicional a las de SOLIDWORKS en el área estructural, fluidodinámica y transferencia de calor; se encuentran, entre otras, las siguientes:

- **Módulo AC/DC**

Simula componentes y dispositivos eléctricos que dependen de fenómenos electrostáticos, magnetostáticos y aplicaciones electromagnéticas cuasiestáticas, particularmente acopladas a otras físicas. Consta de interfaces específicas para aplicaciones de maquinaria rotatoria e importación de listas de circuitos.

- **Módulo acústico**

Contiene incorporados modos de aplicación y ajustes de contornos para el modelado de propagación acústica en sólidos y fluidos estacionarios. También modela aplicaciones aeroacústicas en fluidos móviles.

- **Módulo baterías y celdas combustibles**

Este módulo es una herramienta especializada, diseñada para modelar todo tipo de aplicaciones de baterías y células de combustible.

- **Módulo ingeniería de reacción química**

Sirve para estudiar sistemas reactivos que incluyen transporte de materiales y energía.

- **Módulo corrosión**

El módulo de corrosión permite a los ingenieros simular la electroquímica de la corrosión y la protección contra la corrosión de estructuras metálicas.

- **Módulo electroquímica**

Modela aplicaciones de electrólisis, electrodiálisis y electroanálisis.

- **Módulo geomecánica**

El módulo de geomecánica es una ampliación especializada para el módulo de mecánica estructural para la simulación de aplicaciones geotécnicas, como túneles, excavaciones, estabilidad de pendientes y estructuras de retención.

- **Módulo RF**

Caracteriza campos electromagnéticos, corrientes y ondas para RF, microondas, óptica y otros dispositivos de alta frecuencia. Permite realizar un extenso post-procesado como cálculo de parámetros S y análisis de campo lejano, como se ejemplifica en la figura N° 11.

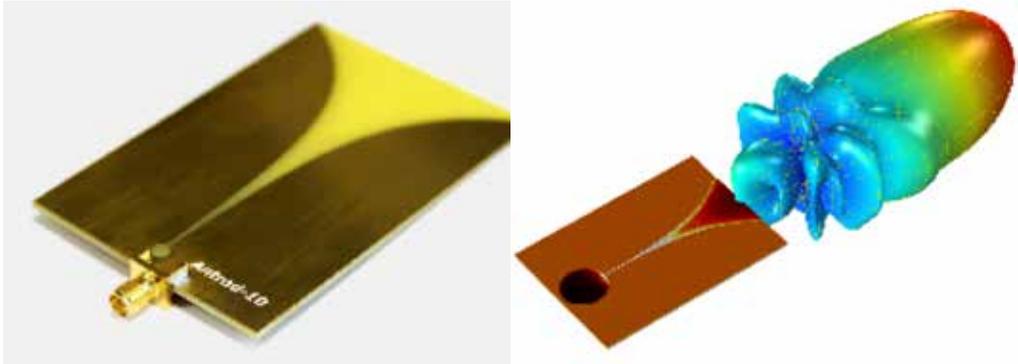


Figura N° 11: COMSOL. Diseño y análisis de propagación, antena Vivaldi.

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

- **Módulo dinámica multicuerpo**
Analiza montajes de cuerpos rígidos y flexibles.
- **Módulo semiconductor**
Simulación de dispositivos semiconductores.
- **Módulo ondas ópticas**
Simula propagación de ondas electromagnéticas en grandes estructuras ópticas (ver ejemplo en la figura N° 12).



Figura N° 12: COMSOL. Optimización del proceso para el sistema de detección electromagnética IED.

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

3.3. ANSYS, Inc. [7]

ANSYS, Inc. fue fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.) utilizando aproximadamente 1.700 empleados, la mayoría con experiencia en elementos finitos (MEF) y dinámica de fluido computacional (CFD).



ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería, a través de un software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otros softwares para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos. Este software es utilizado ampliamente en la industria de la salud, construcción, energía, aeroespacial y Defensa; siendo uno de los referentes, principalmente para el análisis estructural y análisis de fluidos.

Dentro de los paquetes de análisis que ofrece ANSYS se destacan los siguientes:

- **Mecánica estructural (MEF)**
 - ANSYS Mechanical, ANSYS Structural, ANSYS Professional, ANSYS DesignSpace
 - ANSYS Multiphysics
 - ANSYS RigidBody Dynamics
 - ANSYS LS/DYNA
 - ANSYS Autodyn
 - ANSYS ExplicitSTR
 - ANSYS CompositePrepPost
 - ANSYS nCodeDesignLife

- **Dinámica de fluidos (CFD)**
 - ANSYS FLUENT
 - ANSYS CFX, ANSYS CFD-Flo
 - ANSYS Polyflow
 - ANSYS ICEPAK
 - ANSYS CFD Meshing Tools
 - ANSYS CFD-Post

- **Electromagnetismo**
 - ANSYS Maxwell
 - ANSYS Multiphysics

4. APLICACIONES EN EL ÁREA DE DEFENSA [6]

La industria de Defensa, a nivel mundial, ha sido pionera en el uso extensivo de la simulación en ingeniería para incrementar la eficiencia de sus sistemas. Los altos costos asociados y la dificultad de poder realizar pruebas de sistemas de armas complejos,



en tiempo real, bajo condiciones de operación en ambientes operacionales extremos, motivan a los ingenieros a utilizar la simulación con el fin de investigar, diseñar y optimizar sistemas de armas antes de ser fabricados, ponerlos a prueba en terreno e, incluso, en apoyo al proceso de adquisición. La simulación de ingeniería entrega una visión de diseño, permitiendo elaborar protocolos de prueba más eficientes y exitosos.

Para trabajar con problemas que involucran la liberación de una gran cantidad de energía en un período muy corto de tiempo, por ejemplo, el proceso del disparo, detonaciones e impactos, actualmente, existen tres formas de enfrentar la situación: experimental, analítica y numérica. Como este tipo de problemas es altamente no-lineal (normalmente, fenómenos físicos de alta complejidad y de difícil predicción) y requiere información relativa al comportamiento de los materiales en una condición de carga extremadamente alta, la cual generalmente no se encuentra disponible, la mayoría del trabajo es experimental y genera costos altísimos. Se pueden realizar aproximaciones analíticas solo si las geometrías involucradas son relativamente simples, y si la carga puede ser descrita a través de condiciones de borde, condiciones iniciales, o la combinación de ambas. Las soluciones numéricas son mucho más generales en alcance y eliminan cualquier dificultad asociada a geometrías.

Para las estructuras bajo cargas de choque e impacto (detonación), la simulación numérica ha demostrado ser extremadamente útil, ya que provee una manera más rápida y menos costosa de evaluar las nuevas ideas de diseño. Las simulaciones numéricas pueden entregar detalles cuantitativos y precisos referidos a campos de tensiones, esfuerzos y deformaciones, los que serían de un altísimo costo reproducir en forma experimental. En estas simulaciones numéricas, se emplean ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan los principios físicos básicos de conservación de masa, momento y energía. Estas ecuaciones, por resolver, son dependientes del tiempo y de naturaleza no-lineal.

4.1. Ejemplo del diseño de una placa de protección para el vehículo HUMVEE, contra la explosión de un artefacto explosivo improvisado (IED) [7]

Es importante estimar el daño causado a un vehículo y su tripulación, por lo que se hace necesario medir para dimensionar y optimizar la protección por considerar. Los experimentos y pruebas reales son extremadamente costosos, adicionalmente la naturaleza de las cargas estructurales no es fácil de medir, la deflexión o daño causado a un vehículo, debido a variadas incertidumbres y factores. De esta forma, el análisis basado en simulación numérica ha crecido de manera constante, por ejemplo, para estimar el daño experimentado por un vehículo sometido a explosiones por minas o artefactos explosivos improvisados (IED), como se ilustra en la figura N° 13.



Figura N° 13: Vehículo Humvee del Ejército norteamericano, destruido en Bagdad.

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

El siguiente caso de estudio presenta el resultado de un análisis estructural para estimar el daño causado a unas placas de protección, producto de la explosión de un artefacto IED y su posible efecto en la tripulación del vehículo (figura N° 14).



Figura N° 14: Artefacto explosivo improvisado (IED).

Fuente: <http://www.nato.int>

4.2. Situación física

El análisis fue realizado utilizando los softwares LS-DYNA y AUTODYN, ambos de ANSYS. Inicialmente, se definió el tipo de IED por utilizar con el fin de establecer la magnitud de la amenaza y la definición de los espesores de las placas de protección de pruebas por analizar, como se indica en la tabla siguiente:



PLACAS DE PROTECCIÓN DE CARBURO DE BORO (B4C)	
Nº de Placa	Espesor (mm)
Placa Nº 1	30
Placa Nº 2	60
Placa Nº 3	100
Características del IED	
Parámetro	Valor
Peso	103,4 (kg)
Diámetro	268 (mm)
Energía explosiva	52,4 (kg TNT)

Tabla Nº 1: Parámetros del IED y placas de protección utilizados en el estudio.

En la figura Nº 15 se muestra el levantamiento resultante del software, del diseño CAD del vehículo Humvee en estudio. Se busca, al momento de realizar el análisis de ingeniería, que el modelo sea lo más simplificado posible en términos de detalle, con el fin de mantener reducido los tiempos de cálculo, pero que, a su vez, mantenga las características esenciales del diseño, sobre todo en el área de interés o estudio (en este caso, el área inferior del vehículo y el sector interior de la cabina donde va ubicada la tripulación).



Figura Nº 15: Levantamiento del diseño CAD del vehículo Humvee.

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

Levantado el modelo CAD del vehículo, a continuación, se exporta el modelo simplificado al programa CAE para el análisis de ingeniería, en el cual se configura el o los casos de interés de estudio. En la figura Nº 16, se puede apreciar el vehículo; el IED representado por un cilindro de color rojo, y, finalmente, las placas protectoras con un espesor de 30 y 100 mm en el área inferior de ambos vehículos.

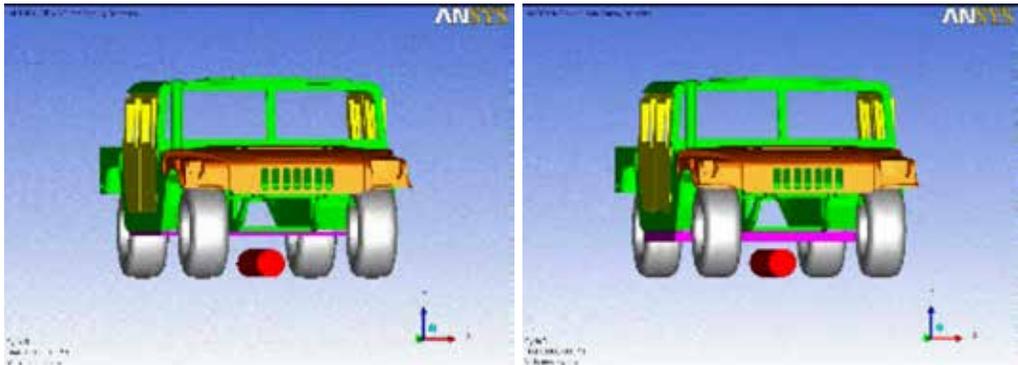


Figura N° 16: Configuración de casos en el software CAE, para espesores de placa protectora de 30 y 100 mm.

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

4.3. Mallado computacional

El proceso de subdividir el modelo en pequeñas partes se llama mallado. En este proceso el programa subdivide el modelo en partes pequeñas de formas sencillas llamadas elementos, que están conectadas en puntos comunes llamados nodos. Los programas de análisis de elementos finitos consideran al modelo como una red de elementos interconectados, siendo un paso crucial en el análisis de diseño. El software crea automáticamente una malla combinada de elementos sólidos, de vaciado y de viga. La malla sólida es adecuada para los modelos voluminosos o complejos en 3D, como el caso del Humvee en estudio (figura N° 17).

La precisión de la solución depende de la calidad de la malla. En general, cuanto más delgada o fina es la malla, mayor es la precisión.



Figura N° 17: Mallado del vehículo Humvee. Malla de 400.000 elementos finitos.

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

4.4. Resultados gráficos

Después de asignar los materiales; definir las cargas y restricciones; y mallar el modelo, se ejecuta el caso de estudio para calcular los resultados. En la figura N° 18, se puede visualizar la evolución de la detonación en función del tiempo. A los 0,9 ms, se puede apreciar el efecto de la fragmentación del artefacto explosivo y la onda de choque contra la placa protectora de 30 mm, la cual cede ante la carga explosiva, permitiendo el traspaso de gran parte de la energía a la cabina del vehículo.



Figura N° 18: Simulación de la detonación de un IED después de 0,25 ms (izquierda) y 0,9 ms (derecha).

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

En las figuras N° 19 y 20 se pueden visualizar el efecto final del artefacto explosivo IED sobre las placas protectoras en estudio y la estructura de la cabina del vehículo.

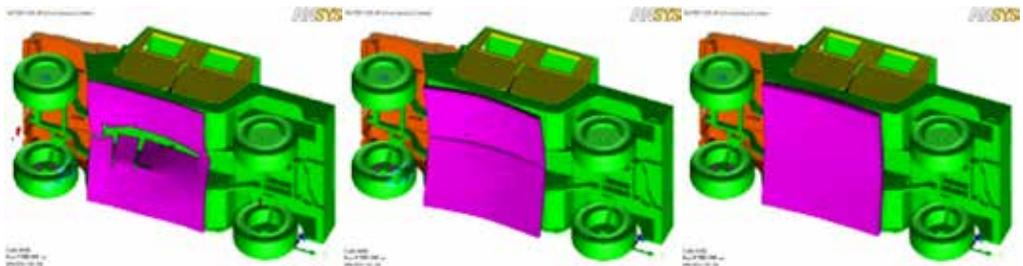


Figura N° 19: Efecto de la detonación de un IED en placas de 30 mm (izquierda), 60 mm (centro) y 100 mm (derecha).

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

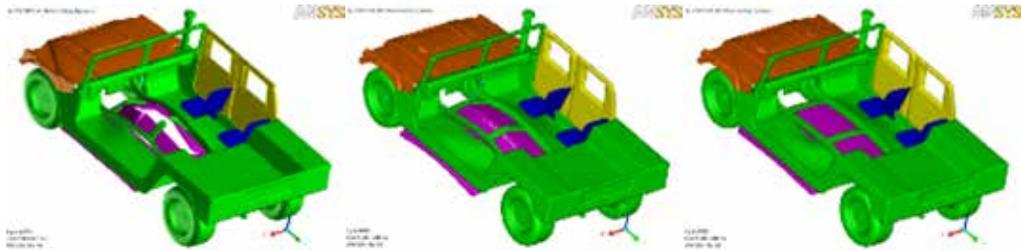


Figura N° 20: Efecto de la detonación de un IED en la cabina para placas de 30 mm (izquierda), 60 mm (centro) y 100 mm (derecha).

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

De acuerdo con los resultados obtenidos, el ingeniero de diseño puede dimensionar y medir el daño estructural producido sobre el vehículo, dado un tipo de carga explosiva a una distancia definida, y así determinar si el material de la placa protectora es el adecuado y si el espesor de esta es óptimo, para aislar a la tripulación de la explosión. Lo anterior permitirá normar y estandarizar criterios de protección para el personal en este tipo de vehículos.

5. CONCLUSIONES

Nuevos conceptos y modelos de SAs pueden ser desarrollados y, fácilmente, sometidos a pruebas con la asistencia de los métodos de simulación modernos. El diseño inicial de unidades y sistemas debe ser lo más seguro y óptimo posible, por lo tanto, la mayoría de los conceptos de diseños son analizados ingenierilmente con el apoyo de computadores.

Las estimaciones basadas en la experiencia, cada vez más, son reemplazadas por el uso de software de diseño, los cuales permiten reducir el ensayo y error en la etapa de diseño, reduciendo, a su vez, considerablemente los costos y tiempos de desarrollo.

Dentro del proceso de diseño de ingeniería mediante el uso de simulación numérica, el mallado computacional es considerado una de las tareas más difíciles y la que más consecuencias conlleva en la precisión de los resultados. Luego, la selección del programa y sus ajustes para realizar el caso de ingeniería en estudio (análisis estructural, mecánica de fluidos y transferencia de calor, análisis de fatiga, análisis RF, acústico o AC/DC y/o de otra naturaleza) y obtener resultados, en un tiempo computacional razonable, es, a veces, una tarea más difícil.

Pero los pasos más importantes durante el CAE son la evaluación e interpretación de los resultados, seguidos por las modificaciones e iteraciones para la optimización



del diseño, el que una vez verificado puede pasar a su proceso de fabricación, para finalmente ser validados a través de protocolos de pruebas en terreno que permitan dar completa seguridad de que el sistema de armas y sobre todo el personal que los opera, estarán trabajando en un ambiente operacional seguro y eficiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AWREJCEWICZ, J. (2011). Numerical Analysis - Theory and Application, InTech.
- [2] DISTON, D. (2009). Computational Modelling of Aircraft and the Environment. West Sussex, United Kingdom: John Willey & Sons Ltd.
- [3] KUNWOO, L. (1999). Principles of CAD/CAM/CAE System. United States: Addison Wesley Longman.
- [4] NARAYAN, K. (2008). Computer Aided Design and Manufacturing. New Delhi: Prentice Hall of India.
- [5] PEIRÓ, J. y SHERWIN, S. (2005). Handbook of Materials Modeling. New Delhi, India: Springer Netherlands.
- [6] RAMEZANI, A. (2016). Computer-Aided Engineering Simulation for Defense and Security. Hamburg, Germany: University of Federal Armed Forces.
- [7] www.ansys.com
- [8] www.comsol.cl
- [9] www.solidworks.com

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**NUEVAS FORMAS DE CARBONO Y SUS
APLICACIONES EN DEFENSA**



NUEVAS FORMAS DE CARBONO Y SUS APLICACIONES EN DEFENSA

Sr. Ricardo Letelier Domínguez.¹

Resumen: *El presente artículo es una revisión de las investigaciones más relevantes en torno a las propiedades de los alótropos de carbono (fullerenos, nanotubos de carbono, nanofibras y grafeno) y su posible aplicación en tecnología militar. Se describen con algún grado de detalle las tecnologías más conocidas de obtención y las propiedades que jugarán un papel central en el desarrollo de aplicaciones militares.*

Palabras claves: *Carbono, alótropos de carbono, fullerenos, aplicaciones en Defensa.*

Abstract: *This article is a survey on the most relevant researches being carried out on the properties of carbon allotropes (fullerene, carbon nanotubes, carbon nanofibers and graphene) and on their potential applications in military technologies. The best known production technologies and properties are described in some detail. These will play a central role in the development of military applications.*

Key words: *Carbon, carbon allotropes, fullerenes, Defense applications.*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido un desarrollo explosivo que se ha traducido en un sinnúmero de publicaciones en relación con las nuevas formas de carbono, sus excelentes propiedades y potencialidad de sus aplicaciones, que muestran a estos materiales como los más revolucionarios conocidos en el presente y que probablemente tendrán un enorme impacto en muchos sectores de la industria, particularmente, entre ellos el de Defensa, que son la motivación esencial de este artículo.

El artículo que aquí se presenta no pretende ser comprensivo ni profundizar demasiado en las complejidades de las tecnologías más importantes en la actualidad

¹ Ingeniero Civil Químico, PhD Chemistry, Profesor Adjunto de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.



en la obtención de alótropos de carbono y en el rango de posibles aplicaciones, sino que lo hace a modo de *background* sobre las investigaciones más importantes y sus aplicaciones militares. Visto de este modo, este artículo pretende ser una sencilla guía de consulta sobre el estado actual de las tecnologías asociadas a fullerenos, nanotubos de carbono y del grafeno y de sus potenciales aplicaciones especialmente en el sector de la futura tecnología militar, sin perder de vista la extraordinaria dinámica de desarrollo en torno a este tema.

2. FULLERENOS

2.1. El descubrimiento del fullereno

En 1943 los físicos nucleares alemanes Hahn y Strassman notaron la producción de racimos de iones de carbono hasta masas de C15+ en arcos voltaicos de alta frecuencia que utilizaban electrodos de grafito. A comienzos de 1970, el químico japonés E. G. Osawa se dio cuenta de que estructuras cerradas de una capa de carbono deberían ser aromáticas y en consecuencia planas y estables, observación que fue corroborada posteriormente mediante cálculos mecánico-cuánticos y que mostraron un gran gap de energía HOMO (orbital ocupado más alto) – LUMO (orbital desocupado más bajo) de 1.7 eV. La inclusión en estas estructuras de anillos de 5 miembros producen estructuras combadas, precursoras de las estructuras cerradas de fullerenos.

A pesar de estas predicciones teóricas, los fullerenos no fueron observados en forma experimental sino hasta septiembre de 1985 por un grupo de científicos de la Rice University, en Houston, Texas. Los científicos participantes en el descubrimiento fueron Kroto, Smalley y Curl, episodio que les valió posteriormente el premio Nobel de química en 1996.

El descubrimiento fue casual durante un experimento de vaporización de una vara de grafito en una atmósfera de helio para producir plasma de carbono con el objeto de caracterizar materia interestelar no identificada.

El producto obtenido en el laboratorio, en forma de hollín, que fue identificado por espectroscopía de masa, como se muestra en la figura N° 1, indicaba la formación de moléculas de 60 átomos de carbono (masa molecular 720 uma) y de geometría muy posiblemente esferoidal.

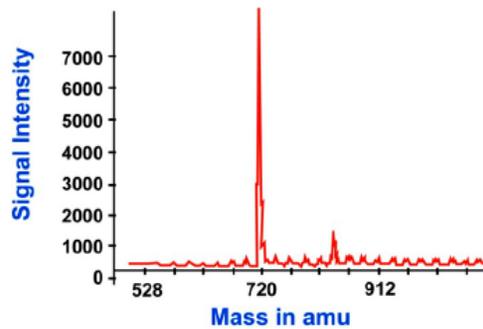


Figura N° 1: Espectro de masa del hollín que contiene C_{60} .

2.2. C_{60} : Un alótropo de carbono inusual

Los fullerenos son estructuras de cajas cerradas vacías, consistentes en átomos de carbono interconectados en anillos pentagonales y hexagonales. Cada carbono de la superficie se encuentra unido a tres carbonos vecinos, en consecuencia con hibridación sp^2 . El fullereno más famoso es C_{60} , también conocido como buckyball, figuras N° 2 y 3.

Otros agregados relativamente comunes son C_{70} , C_{72} , C_{74} , C_{76} , C_{80} , C_{82} y C_{84} , existen muchas más moléculas mayores o menores que C_{60} , pero mucho menos abundantes en la mezcla de fullerenos que se encuentran en el hollín.

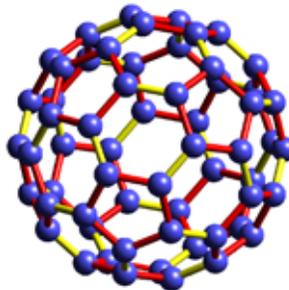


Figura N° 2: Estructura de C_{60} o buckyball.

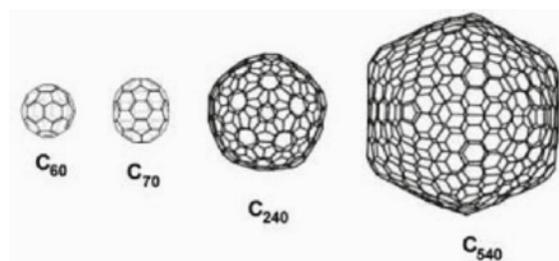


Figura N° 3: Otras estructuras superiores de fullerenos.



2.3. Algunas propiedades de C_{60}

- Se disuelve en solventes comunes como benceno, tolueno y hexano.
- Sublima rápidamente alrededor de los 400 °C.
- Tiene una muy baja conductividad térmica.

El C_{60} puro es un aislador eléctrico, pero cuando es dopado con metales alcalinos muestra un rango de conductividad eléctrica que cambia su condición desde aislador ($K_6 C_{60}$) hasta superconductor ($K_3 C_{60}$) < 30 °K.

3. FULLERENOS: POSIBLES USOS EN DEFENSA

3.1. Dispositivos ópticos limitadores

Entre las varias propiedades que exhiben las moléculas de fullereno (C_{60}), es su respuesta no lineal a estímulos ópticos la que ha concitado el mayor interés desde el punto de vista militar en la aplicación al diseño de dispositivos ópticos limitadores. [1, 2] Este comportamiento fue inicialmente detectado en soluciones de C_{60} en tolueno y más recientemente, con mejor perspectiva de uso práctico, en películas de poliuretano que contienen incluidas moléculas de fullereno. [3]

La óptica no lineal describe el comportamiento de la luz al atravesar un medio en que la polarización dieléctrica responde no linealmente al campo eléctrico E, produciendo fotones de naturaleza muy distinta a los originales. Este fenómeno se observa a valores muy altos de intensidad luminosa, como aquellos generados por un láser. Las respuestas no lineales son de variados tipo, algunos ejemplos de respuesta no lineal de segundo orden se muestran en la figura N° 4.

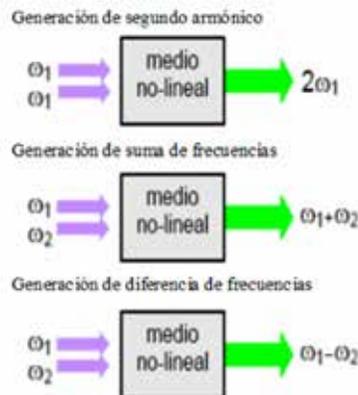


Figura N° 4: Algunos fenómenos no lineales de segundo orden.



Los limitadores ópticos son dispositivos diseñados para tener alta transmitancia para *inputs* de bajo nivel de intensidad, al mismo tiempo que bloquean la transmitancia de rayos de muy alta intensidad. Estos dispositivos se construyen con el objeto de proteger sensores ópticos contra daños inducidos por láseres. [4, 5] La figura N° 5 muestra esquemáticamente la forma en que operan estos dispositivos.

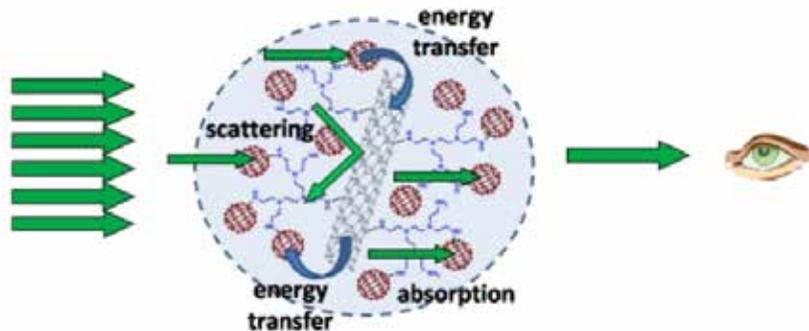


Figura N° 5: Materiales híbridos de carbono (fullerenos, más nanotubos) como protectores contra haces intensos de luz láser.

3.2. “Buckybomb” un explosivo a nanoescala en base a nitro fullereno ($C_{60}(NO_2)_{12}$)

En aplicaciones tanto civiles como militares, los materiales energéticos como explosivos, propelentes y pirotécnicos encuentran amplio campo de uso, y en consecuencia continuos esfuerzos en desarrollar nuevos, más poderosos y versátiles materiales de estas características. En particular, los explosivos a nanoescala son un grupo especial por su altísima densidad de enlaces covalentes energéticos, y serían, en teoría, una clase de poderosos explosivos.

Si bien los estudios sobre nanoexplosivos en base a nitro fullerenos se encuentran aún a nivel teórico [6], los resultados de dinámica molecular se muestran promisorios.

El mecanismo químico de la explosión a nanoescala muestra que luego de un calentamiento inicial de $C_{60}(NO_2)_{12}$, este se desintegra aumentando la temperatura y presión en miles de kelvins y bars en un período de décimas de picosegundo. La explosión comienza con isomerización del grupo NO_2 en C–O–N–O, seguido por emisión de moléculas de NO y formación de grupos CO en la superficie del buckyball. El NO se oxida a NO_2 , y C_{60} se desarma liberando CO_2 . Los estudios muestran que la temperatura inicial y la energía liberada dependen fuertemente de la composición química y la densidad del material.



3.3. Hidruros de fullereno como materiales almacenadores de hidrógeno de alta capacidad

Teóricamente, se pueden unir 60 átomos de hidrógeno a una molécula de fullereno, ya sea internamente (endoédrico) o externamente (exoédrico), a la superficie esférica de la molécula con la formación entonces de un isómero estable $C_{60}H_{60}$ cargado con aproximadamente 7.7% en peso de hidrógeno. Ya que muchas reacciones en las que interviene fullereno parecen ser reversibles, si se logra un 100% de conversión de $C_{60}H_{60}$ entonces 30 moles de H_2 gaseoso se liberarán por cada mol de hidruro de fullereno:



Dado que 1 mol de H_2 gaseoso puede producir 67.25 [W x hr] de potencia eléctrica, 30 moles de H_2 generados por 1 mol de $C_{60}H_{60}$ producirían 2017.5 [W x hr] o bien 4.4 [MWxhr/m³]. La densidad de $C_{60}H_{60}$ es ~1700 [kg/m³].

El proceso considera la formación de enlaces C–H como resultado del rompimiento de los dobles enlaces C=C de fullereno y de los enlaces H-H del hidrógeno molecular. Aunque la reacción es exotérmica, se requiere energía adicional para llevar a cabo la ruptura de esos enlaces, además de una barrera de activación. Experimentalmente se ha encontrado [7, 8] que en la hidrogenación de fullereno sólido en una atmósfera de hidrógeno a temperaturas entre 400 °C y 450 °C y presiones de 60 – 80 [MPa], la energía de activación es de alrededor de 100 [kJ/mol].

Para el proceso de deshidrogenación, la barrera energética para romper los enlaces C–H y restablecer los enlaces C=C, y formar H_2 molecular es del orden de 160 [kJ/mol] (figura N° 6).

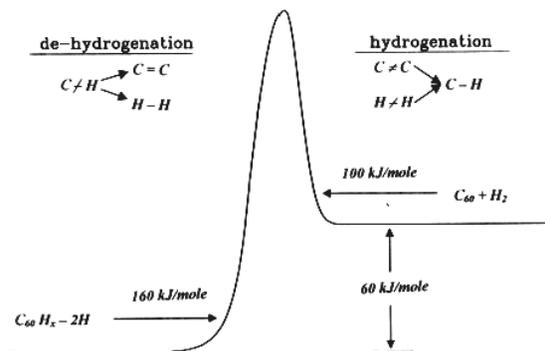


Figura N° 6: Modelo esquemático para la hidrogenación y deshidrogenación de fullereno.



4. NANOTUBOS DE CARBONO (NTC)

Los nanotubos son otra forma alotrópica de carbono. Estas moléculas cilíndricas de carbono tienen propiedades muy interesantes que las hacen potencialmente útiles en muchas aplicaciones en nanotecnología, electrónica óptica y otros campos de la ciencia de materiales y de la arquitectura. Son eficientes conductores eléctricos y del calor, y sin embargo su utilidad es limitada por su toxicidad potencial.

4.1. Descubrimiento de los nanotubos

En el año 1991 se descubren los nanotubos, descubrimiento que surge del intento de producir fullerenos dopados con metales, los que fueron inicialmente denominados buckytubes. Estos nanotubos tenían la forma de cilindros cerrados en los extremos por un casquete esférico con la estructura de un fullereno. En función de la orientación de los hexágonos del grafeno respecto del eje, estos nanotubos presentaban diferentes estructuras.

Se precisó que los nanotubos formados por un plano, o nanotubos de carbono de pared simple (SWNT), tenían un diámetro de entre 1 y 2 nm. Adicionalmente a los SWNT, se encontraron también otros nanotubos formados por cilindros concéntricos, denominándose a estos como nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT).

4.2. Preparación de los NTC

Los nanotubos de carbono pueden ser fabricados de diversas maneras [9], en algunas de ellas resulta difícil de controlar los largos y diámetros de los NTC, otros métodos sí permiten fabricar nanotubos con ciertas especificaciones previas.

4.2.1. Mediante descargas de arco eléctrico

Los NTC han sido detectados en el hollín que producen las descargas de arco eléctricos de muy alta intensidad en los electrodos de grafito. La longitud máxima de los NTC obtenidos por esta vía ha sido de hasta 50 micrones (figura N° 7).

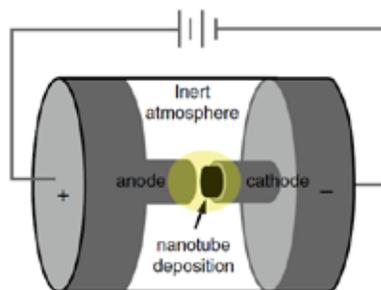


Figura N° 7: Diagrama esquemático de un aparato de descarga de arco.



4.2.2. Mediante ablación por láser

En este proceso, un láser de pulsos vaporiza un blanco de grafito en un reactor de alta temperatura donde además se inserta un gas inerte. Los NTC se desarrollan sobre las superficies más frías del reactor a medida que el carbono vaporizado condensa. En el aparato esquemático de la figura, el rayo láser vaporiza una mezcla de grafito y un catalizador metálico (Co, Ni) dentro de un flujo, a presión controlada, de un gas inerte en un horno tubular a 1200 °C. Los NTC se depositan en un colector enfriado por agua fuera del horno (figura N° 8).

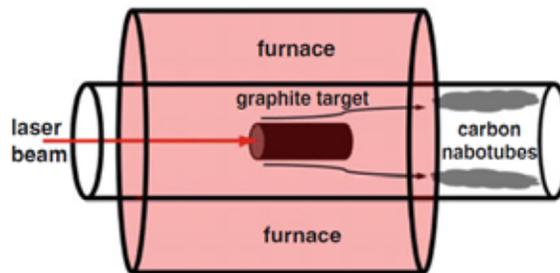


Figura N° 8: Diagrama esquemático del método de ablación por láser.

4.2.3. Deposición química de vapor (CVD)

Los filamentos y fibras de carbono han sido producidos mediante CVD (de sus siglas en inglés Chemical Vapor Deposition) de hidrocarburos en presencia de catalizadores desde 1960. [9, 10] La técnica ha sido subsecuentemente mejorada y optimizada. El proceso CVD normalmente requiere la descomposición catalítica de un hidrocarburo, generalmente etileno o acetileno en un reactor tubular a 550-750 °C, y el posterior crecimiento del NTC sobre el catalizador (nanopartículas de Fe, Ni o Co) en un sistema de enfriamiento como se muestra en la figura N° 9.

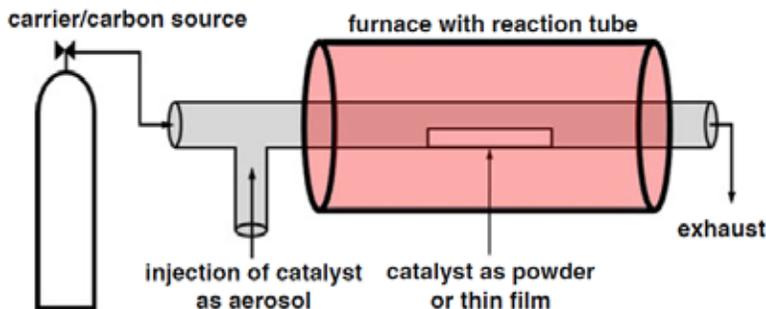


Figura N° 9: Diseño esquemático de un sistema térmico CVD con horno de tubo.



5. ESTRUCTURA DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO

Partamos con grafito, la forma más estable de carbono cristalino, que consiste, como se vio anteriormente, en placas unidas por fuerzas débiles del tipo Van der Waals (distancia entre capas ~ 0.34 nm) en las que los átomos de carbono se encuentran fuertemente enlazados (distancia C-C 1.44 nm) y ubicados en los vértices de hexágonos que llenan todo el plano. Los NTC pueden considerarse como una única lámina atómica de grafito cristalino, el grafeno, curvada en forma cilíndrica y unida “sin costura”.

La estructura de un nanotubo de pared simple (SWNT) se expresa en términos de una celda unitaria unidimensional definida por el vector:

$$v = n \cdot a_1 + m \cdot a_2$$

Donde a_1 y a_2 son los vectores unitarios y n y m enteros. Un nanotubo construido de esta manera se denomina nanotubo (n,m) .

Al enrollar la lámina alrededor del eje de simetría resulta una estructura en tubular tipo Zig-Zag ($m = 0$) o una tipo Sillón (armchair) ($n = m$). También es posible enrollar la lámina de manera que difiera del eje de simetría para obtener una estructura Quiral, como se muestra en la figura siguiente:

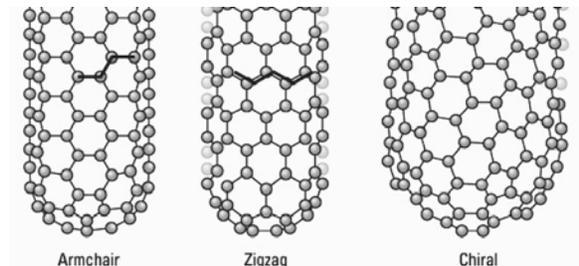


Figura N° 10: Diferentes orientaciones de los hexágonos en NTC.

Al igual que el ángulo quiral, la circunferencia del cilindro también puede variar.

Nanotubos de carbono con los hexágonos orientados en la configuración “armchair” (hexágonos paralelos al eje del nanotubo) tienen comportamiento metálico, y son en efecto mejores conductores que el cobre y cualquier otro metal.

Una inspección de la figura N° 10 muestra que los tubos son cerrados. ¿Cómo crecen los nanotubos y se cierran finalmente de esa forma?, el mecanismo propuesto [10, 11] se denomina de “scooter”, en el cual un átomo del metal catalizador quimisorbido



circula (“scoots”) alrededor del extremo abierto del tubo y absorbe pequeñas moléculas o átomos de carbono y las convierte en láminas tipo grafito enlazándolas al tubo. El tubo crece hasta su saturación por exceso de catalizadores operando, o por exceso de átomos de carbono tratando de adherirse, y el tubo finalmente se cierra (figura N° 11).



Figura N° 11: Una ilustración del mecanismo de “scooter” para el crecimiento de un NTC (10, 10) asistido por un átomo de Ni quimisorbido en el extremo abierto del NTC.

6. PROPIEDADES Y POSIBLES USOS EN DEFENSA DE NTC

6.1. Propiedades mecánicas del NTC

Pocos materiales muestran propiedades tan extremas como los NTC. Su módulo de tensión puede llegar a ser del orden de 1 TPa, con resistencia que puede llegar a 200 GPa (para comparar, la resistencia de los mejores aceros es alrededor de 4GPa). Debido a estas características, la mayoría de las investigaciones se han dirigido a la fabricación de nanocompuestos de gran fortaleza mecánica mediante la incorporación de nanotubos en las matrices de materiales de extensivo uso en tecnología militar. [12, 13]

El diámetro de los NTC es generalmente inferior a 1 nanómetro, sin embargo se han reportado longitudes de algunas de estas macromoléculas de hasta 10 centímetros, por lo que la relación de longitud al diámetro puede llegar a ser del orden de 10 millones, propiedad que puede ser usada como reforzamiento de fibras poliméricas al incorporarlos en la matriz del material compuesto. Un ejemplo es el refuerzo de PBO (poli p-fenilene-2,6 benzodisoxazol), donde la incorporación de un 10% de adición de NTC a PBO muestra que se duplica la capacidad de absorción de energía en trajes de protección livianos. [1] También ha habido intentos de incorporar nanotubos a policarbonato para protección balística. [14]

6.2. Propiedades térmicas del NTC

La conductividad térmica en la dirección del eje mayor en un NTC es mucho mayor que la del cobre, sin embargo, es muy pobre en la dirección perpendicular, lo que



sugiere posibles aplicaciones en control térmico en la forma de espumas de carbón con nanotubos incorporados, que tienen resistencia a muy altas temperaturas y flujos de calor sin arder con posibles aplicaciones a recubrimientos de misiles de alta velocidad. [15]

6.3. Propiedades eléctricas del NTC

Las posibles aplicaciones del NTC en Defensa estarán relacionadas con las mejoras que vendrán asociadas a todos los dispositivos eléctricos y electrónicos, y la miniaturización. La conductividad eléctrica longitudinal de los NTC es excepcionalmente elevada. Se han medido densidades de corriente de hasta 10 millones de $[A/cm^2]$ pasando a través de nanotubos. [16]

En la actualidad, debido a la alta capacidad para almacenar electricidad de los NTC, la principal aplicación, al parecer, estaría en la fabricación de supercondensadores como una forma de reemplazar baterías primarias y recargables en dispositivos varios. [17]

6.4. Propiedades químicas del NTC

La gigantesca relación longitud/diámetro de los NTC significa también una enorme razón superficie/volumen que sin duda amplifica cualquier propiedad que tenga relación con su superficie. [1] Esta propiedad se puede utilizar en el diseño de sensores químicos, un área de intensa investigación en la actualidad, [20] en dispositivos para la detección de NH_3 , CO , N_2 y O_2 en concentraciones tan bajas como 100 ppm.

La aplicación en tecnología de defensa más obvia dice relación con la detección de DMMP (dimetil-metil-fosfonato), un gas estimulante nervioso. El diseño de un dispositivo que incorpora una red de NTC permite detectar, selectivamente, DMMP a concentraciones sub-ppm. [21]

La propiedad más intensamente estudiada dice relación con la habilidad de almacenar hidrógeno [1, 18, 19], como ya se discutió este proceso con fullerenos. Sin embargo, esto se encuentra en etapas primarias y es poco claro cómo pueden diseñarse dispositivos de utilidad práctica.

La principal aplicación, desde el punto de vista militar, para nanotubos saturados con hidrógeno, es como material energético. [1] Las investigaciones han estado orientadas hacia la preparación de propelentes multifuncionales combinando polvo de carbón (hollín) y nanotubos saturados con hidrógeno para obtener un material propelente de buena conductividad eléctrica y alto contenido energético.



6.5. Propiedades ópticas del NTC

Las propiedades ópticas del NTC no han recibido mucha atención en cuanto a relevancia para la tecnología militar. Las investigaciones descritas en la literatura se refieren al diseño de materiales y humos oscurecedores, principalmente a la radiación infrarroja y que tengan la cualidad de ser no tóxicos.

Materiales oscurecedores y humos son materiales muy útiles en combate ya que pueden vencer a rastreadores, sensores, dispositivos que incrementan la capacidad óptica, buscadores y el ojo humano. Los oscurecedores, en general, operan en el rango de longitudes de onda corta visible (0.4 micrones) hasta el lejano IR (25 micrones). Combinando NTC con fibras de polímeros conductores se ha logrado optimizar un material no tóxico, oscurecedor de radiación IR. [22]

7. COMPOSITOS DE NANOTUBOS DE CARBONO

Un método para reducir la impronta al radar de un objeto es controlar la conductividad eléctrica de la superficie mediante modulación de las pérdidas eléctricas para amortiguar las señales reflejadas. Como, por otra parte, los NTC contribuyen a la fortaleza mecánica de un material compuesto (composito), se pueden fabricar recubrimientos mecánicamente resistentes incrementando hasta un 40% en el módulo elástico y 25% en resistencia a la tracción, de este modo, estos materiales compuestos reducen la carga a llevar de los recubrimientos amortiguadores de radar. [23] Por otro lado, una aplicación en defensa similar aprovecha la conductividad eléctrica de compositos de NTC para recubrimientos de aeroplanos y así reducir el riesgo de penetración y daños en el evento de que un rayo golpee la aeronave.

8. GRAFENO

El grafeno, el alótropo de carbón bidimensional, es el material posiblemente más versátil jamás descubierto en la Tierra por sus increíbles propiedades. Se trata del material más liviano, más fuerte y que conduce calor y electricidad mejor que ninguno, por lo que es posible en un número incontable de aplicaciones.

El grafeno es el material más delgado jamás creado. Un millón de láminas de grafeno apiladas no son más gruesas que un cabello humano, y sin embargo el grafeno es 200 veces más fuerte que el acero. Su extraordinaria delgadez se debe a que se trata de una lámina plana monoatómica de átomos de carbono con hibridación sp^2 unidos por fuertes enlaces σ y densamente empacados en una estructura cristalina similar a un panal de abejas (figura N° 12).

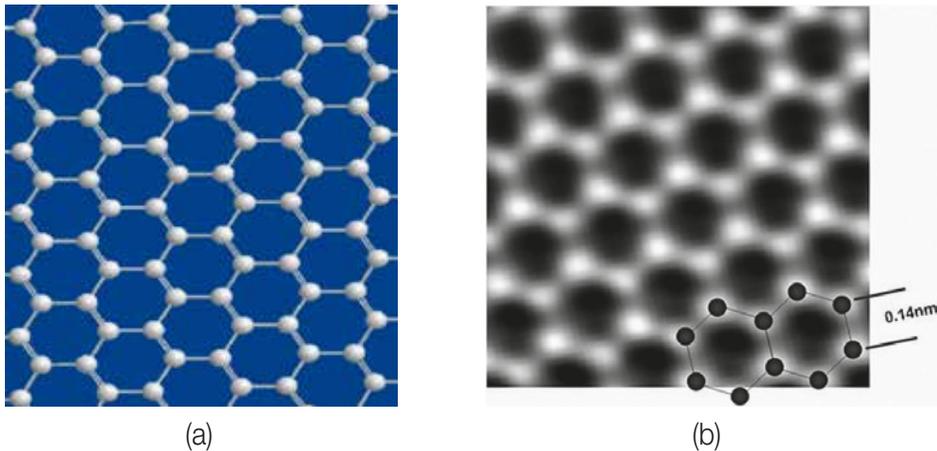


Figura N° 12: a) Estructura molecular de grafeno, b) Imagen de alta resolución de microscopía de transmisión electrónica (TEM).

Siendo el grafeno un material tan delgado y estable en las condiciones ambientales, y con extraordinarias propiedades, resulta ser un andamiaje perfecto para la producción de otros materiales también superlativos. [24]

8.1. El descubrimiento del grafeno

El término grafeno apareció por primera vez en 1987 para describir las láminas individuales de grafito en compuestos de intercalación de grafito (CIGs). Las láminas individuales (cristales 2D) teóricamente no pueden crecer espontáneamente y permanecer estables, como lo demostraron Landau y Peierls en 1930 con argumentos termodinámicos: *“Los cristales 2D recién formados tratan de minimizar su superficie e inevitablemente se deforman en la variedad de estructuras 3D estables que se encuentran en el hollín... se puede engañar a la naturaleza y extraer cristallitos de un átomo de espesor que bajo condiciones especiales permanezcan estables”*.

Aunque los científicos sabían, por la estructura cristalina del grafito, que el cristal bidimensional de un átomo de espesor de grafeno existía, no se había desarrollado un método para extraerlo, que no fuera en las delgadas capas que deja un lápiz de grafito al escribir.

En el año 2004, en la universidad de Manchester en Inglaterra, los investigadores Andre Geim y Kostya Novoselov fueron capaces de producir artificialmente y aislar grafeno por primera vez. Literalmente, ellos tomaron un trozo de grafito y lo disectaron capa por capa hasta que solo quedó una última capa, en un proceso conocido como exfoliación.

El grafeno es esencialmente el bloque básico de construcción de todos los materiales gráficos de todas las otras dimensionalidades (figura N° 13).

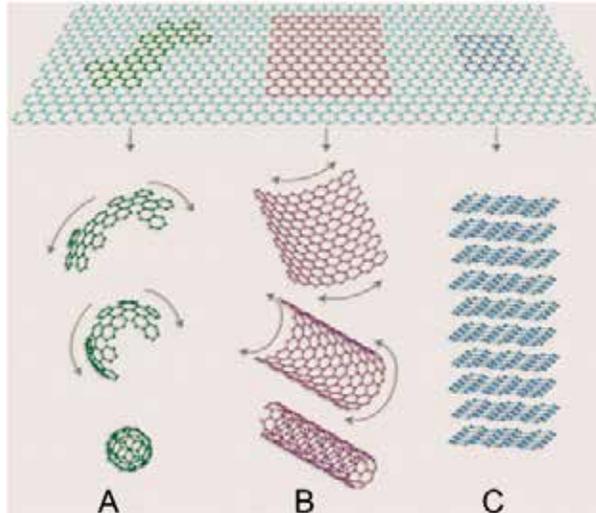


Figura N° 13: Materiales grafiticos derivados del grafeno. A) Fullerenos, B) Nanotubos de carbono, C) Láminas de carbono.

9. FABRICACIÓN O AISLAMIENTO DE GRAFENO

Hay varias maneras por las cuales los científicos han podido producir grafeno. La primera vía exitosa de producir una monocapa de grafeno es mediante exfoliación mecánica y química. [26] Sin embargo, en todos los centros de investigación actualmente se trabaja intensamente en diseñar mejores y más eficientes métodos de producir grafeno de mejor calidad. Existen dos aproximaciones al problema: métodos Top-down, esencialmente a partir de grafito, y métodos Bottom-up o la síntesis directa de grafeno.

Aunque esta revisión no es exhaustiva aquí se muestran algunos de ellos.

9.1. Métodos Top-down

9.1.1. Deposición química de vapor (CVD) [25]

Es el método más común de crear monocapas y algunas capas de grafeno. Esta es una técnica que consiste en extraer átomos de carbono desde una fuente rica en ellos mediante reducción y depósito en un sustrato adecuado.

Típicamente, un sustrato de cobre se expone a un proceso de templado a baja presión y 1000 °C, y a través del horno fluyen gas metano e hidrógeno como reductor (ver figura N° 14). Los átomos de carbono del metano se depositan sobre el cobre creando una lámina continua de grafeno.

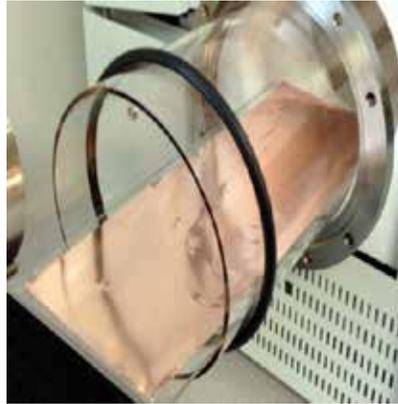


Figura N° 14: Técnica CVD sobre sustrato de cobre.

9.1.2. A partir de carburo de silicio [26]

En esta técnica, una pequeña cantidad de carburo de silicio es puesta en un recipiente que tiene un agujero. Este recipiente se sella al vacío o con gas argón y luego es calentado a 1500 °C. La alta temperatura causa que los átomos de silicio, moléculas de SiC_2 y Si_2C se evaporen dejando tras sí una capa de grafeno (figura N° 15).

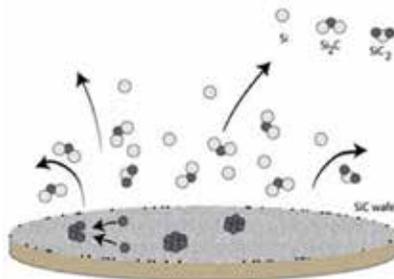


Figura N° 15: Diagrama esquemático de la técnica del carburo de silicio.

9.1.3. A partir de compuestos de intercalación [27]

Un compuesto de intercalación consiste en la inclusión de átomos o moléculas entre las capas de grafito. Esta técnica para producir grafeno usualmente no produce monocapas sino láminas de varias capas. Para producir grafeno, el proceso comienza con la intercalación de átomos de potasio entre capas de grafito, y luego el compuesto de intercalación es hecho reaccionar violentamente con alcohol (figura N° 16), produciendo la exfoliación

en láminas de hasta 30 capas de grosor. La técnica ha sido mejorada mediante la intercalación de oxígeno para producir láminas de mayor tamaño y grafeno a gran escala. [28]

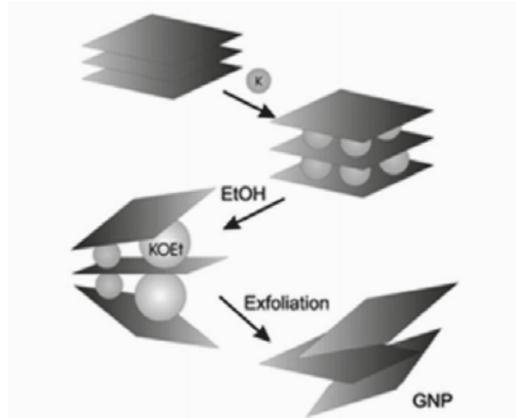


Figura N° 16: Diagrama esquemático que muestra el proceso de intercalación y exfoliación en grafito.

9.1.4. Mediante apertura de nanotubos de carbono [29]

Mediante esta tecnología se producen nanocintas de grafeno. La técnica consiste en la oxidación mediante permanganato de potasio de dobles enlaces en una hilera de un nanotubo de carbono, rompiendo de esta manera la pared tubular, como se muestra en la figura N° 17. El proceso no garantiza una cinta perfecta ni que el nanotubo se abra completamente. En la actualidad parece ser solamente un interesante ejercicio académico.

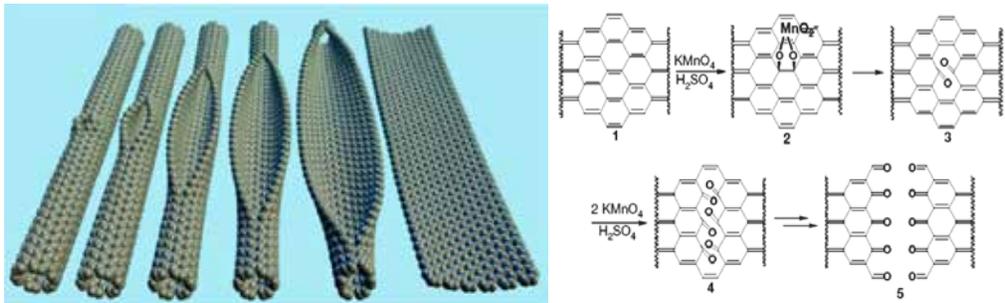


Figura N° 17: Secuencia esquemática del proceso de apertura mediante oxidación de un nanotubo.

9.2. Métodos bottom-up

La síntesis de grafenos bidimensionales de infinita longitud en ambas direcciones es termodinámicamente inestable, como fue ya mencionado. Los cálculos mecánico-cuánticos rápidamente muestran que la estructura más estable, aún para un sistema de pocos átomos de carbono, tiende a adoptar la forma curvada que finalmente dará



origen a un fullereno. Sin embargo, ha habido esfuerzos en intentar esta vía a partir de hidrocarburos policíclicos, moléculas aromáticas que podrían ser precursores adecuados para estos métodos bottom-up.

9.2.1. Síntesis orgánica total [30]

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP o PAH, por sus siglas en inglés) son moléculas planas con carbonos en hibridación sp^2 y unidos entre sí mediante enlaces alternados dobles y simples. Aunque el número de carbonos es pequeño, no más de 20, es fácil visualizar que parecen pequeños trozos de grafeno, y naturalmente su estructura parece ofrecer una vía para la síntesis de grafeno desde esta base. La figura N° 18 muestra esquemáticamente esta suerte de “polimerización” de HAP como vía de generación de grafeno.

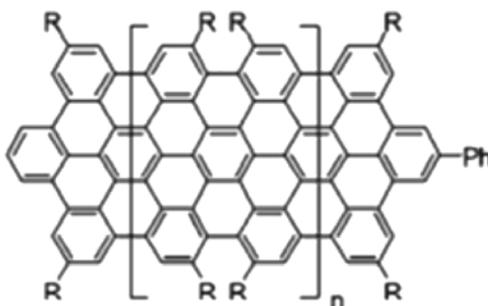


Figura N° 18: La estructura química de un HAP.

10. GRAFENO Y SU POSIBLE USO EN DEFENSA

Las investigaciones sobre producción y uso de grafeno se encuentran en sus primeros comienzos y queda aún por ver las maravillas que se producirán tanto en ciencia fundamental como en sus aplicaciones tecnológicas en un futuro cercano, sin embargo, en la actualidad hay algunas investigaciones con directa aplicación en Defensa.

Ya hay trabajos orientados a la elaboración de nuevos materiales derivados del grafeno. Así, en la Universidad de Wollongong (UOW) en Australia se ha desarrollado un nuevo material compuesto elaborado en base a una mezcla de igual proporción entre grafeno y nanotubos de carbono que produce las fibras más duras que se han fabricado hasta ahora. Su resistencia medida supera 6 veces a la del hilo de una araña y 12 veces al kevlar, y el nuevo material podría resultar más barato y más fácil de hacer por un método de hilado en húmedo. Estas nuevas fibras artificiales podrían utilizarse en aplicaciones tales como los chalecos antibalas y músculos artificiales. [36]



10.1. Armaduras transparentes de compuestos de poliuretano-grafeno [31]

Las extraordinarias propiedades del grafeno han llevado a los investigadores a imaginar un sinnúmero de posibles aplicaciones. El grafeno posee un alto módulo de Young ($\sim 1,100$ Gpa) y también una alta fortaleza a la fractura (125 Gpa), medidos en delicados experimentos como se muestra en la figura N° 19.

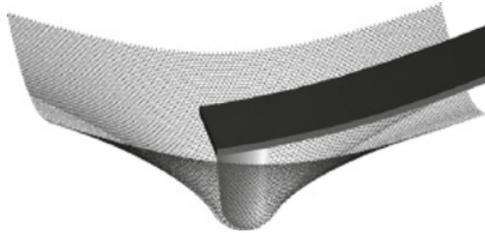


Figura N° 19: Punta de diamante de dos nanómetros de radio indentando una lámina monoatómica de grafeno. (*Science*, 321 (5887): 385).

Por otra parte, una monocapa de grafeno absorbe solo un 2.3% de la luz blanca, o lo que es lo mismo, posee un 97.7% de transmitancia. Esta propiedad, junto con las propiedades mecánicas, permite visualizar aplicaciones en reforzamiento de protecciones antibalas transparentes.

El diseño más común para armaduras transparentes resistentes a impactos de balas consiste en capas alternadas de vidrio y policarbonato. [32, 33] El vidrio actúa como un escudo duro, deformando la bala y disminuyendo su velocidad considerablemente. El policarbonato actúa como un amortiguador y disipa la energía del proyectil al mismo tiempo que aumenta la resistencia del vidrio a la fractura.

El grafeno puede ser incorporado al poliuretano mediante enlaces con oxígeno para formar un material que consiste en tres capas, como se muestra en la figura N° 20.

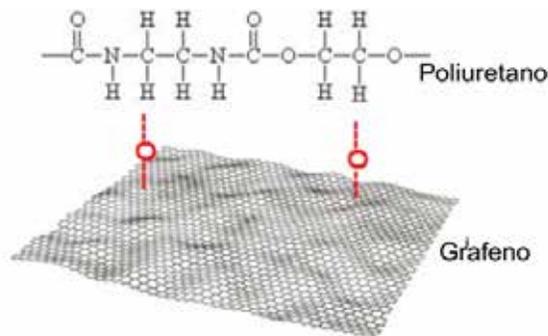


Figura N° 20: Compuesto de poliuretano-grafeno.



De este modo, el material consiste en tres capas (polímero enlazado al oxígeno enlazado al grafeno) en serie con diferentes constantes de deformación. Se puede determinar una constante de deformación efectiva para el sistema completo (suma de las tres constantes) que se reduce a una única capa con un módulo que representa todo el compuesto.

La incorporación de grafeno como refuerzo de nanocompuestos poliméricos es también una línea de investigación en la actualidad. [34]

Las características mecánicas del grafeno pueden también ser útiles en el desarrollo de aplicaciones que requieren alta resistencia, tales como armaduras o protecciones corporales para personal militar y vehículos.

10.2. Detectores de gas de 1-molécula [35]

La excelente conductividad eléctrica del grafeno permite la fabricación de dispositivos para la detección de organismos extraños que al entrar en contacto con grafeno la alteren. Usando esta idea, un grupo de investigadores de la Universidad de Utah, liderado por el profesor L. Zang, han construido un prototipo que demuestra que sensores moleculares basados en grafeno pueden detectar moléculas de todo tipo, en particular la investigación se ha centrado en detectar partículas de explosivos y productos químicos como gas sarín y cloro, con resultados extremadamente rápidos y confiables.

El dispositivo utiliza dos electrodos recubiertos con una capa microscópica de grafeno enrollado. Se determina un patrón de conductividad eléctrica entre los electrodos y al exponerlo a moléculas extrañas, se altera la conductividad de manera específica del sensor.

Las aplicaciones militares y de seguridad son los principales campos de aplicación.

10.3. Otras aplicaciones potenciales del grafeno

La excelente conductividad del grafeno lo hacen adecuado para recubrir el material de superficie de aeronaves como una forma de prevenir daños por impacto de rayos. También como detector de tensiones anómalas en las alas o fuselaje.

Algunos otros usos no militares que pueden ser encontrados en la literatura son:

- Transistores en base a grafeno.
- Circuitos integrados.



- Electrodo conductores transparentes.
- Ultra condensadores para almacenamiento de energía.
- Biodispositivos de grafeno.
- Nanocompuestos conductores térmicos y eléctricos.
- Recubrimientos antiestáticos.
- Compuestos conductores transparentes, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] HOLLINS, R.C. (1999). *Materials for optical limiters. Solid State and Materials Science*, 4, 189; SAVAGE, S.J. (2003). *Swedish Defense Res. Agency, FOI-R-1103-SE*, Dec.
- [2] SHINAR, J.; VARDENY, Z.V. and KAFABI, Z.H. (eds.) (2000). *Optical and Electronic Properties of Fullerenes and Fullerene-based Materials*, Marcel Dekker Inc. NY.
- [3] CHEN, Q. *et al.* (2003). *Applied Physics Letters*, 83, 211.
- [4] HAGAN, D. J. (2000). "Optical Limiting" in *Handbook of Optics*, Vol. 4, M. Bass, Ed, Optical Society Of America.
- [5] LIAO, K.S. *et al.* (2010). *Chemical Physics Letters*, 489, 207.
- [6] CHABAN, V. V.; FILETI, E. E.; PREZHDO, O. V. (2015). *J. PHYS. Chem. Lett.*, 6, 913.
- [7] LOUFTY, R.O.; WEXLER, E.M. Proc. 2001 *DOE Hydrogen Program Rev*, NREL/CP-570-30535.
- [8] YAN, Q.L.; GOZIN, M.; ZHAO, F.Q.; COHEN, A.; PANG, S.P. (2016). *Nanoscale*, 8, 4799.
- [9] POPOV, V.N. (2004). *Materials Science and Engineering*, R 43, 61-102.
- [10] <http://mailhost.ccs.uky.edu/~ernst/carbontubes/structure.html>
- [11] ADLER, J.; HASHIBON, A.; SCHREIBER, N.; SORKIN, A.; SORKIN, S.; WAGNER, G. (2002). "Visualization of MD and MC Simulation for Atomistic Modeling". *Computer Physics Communication*, 147, 665-9.
- [12] THOSTENSON, E.T.; REN, Z.; CHOU, T.S. (2001). *Composite Science and Technology*, 61, 1889.



- [13] LAU, K.T.; HUI, D. (2002). *Composites, B* 33, 263.
- [14] ABDELKADER, M. *et al.* *The investigation of carbon nanotubes for light armour materials*. En: 23rd Army Science Conference, Orlando FL 2002.
- [15] SPRADLING, D.M.; GUTH, R.A. (2003). *Carbon Foams*, *Advanced Materials and Processes*, 161, 29.
- [16] ANDO, Y. *et al.* (1999). Physical properties of multiwalled carbon nanotubes. *International Journal of Inorganic Materials*, 1, 77.
- [17] AN, K.H. *et al.* (2001). *Advanced Functional Materials*, 11, 387.
- [18] ZANDONELLA, C. (2001). *Nature*, 410, 734.
- [19] PRADHAN, B.K. *et al.* (2002). *Journal of Material Science*, 17, 2209.
- [20] CHOPRA, S. *et al.* (2003). *Applied Physics Letters*, 83, 2280.
- [21] NOVAK, J. P. *et al.* (2003). *Applied Physics Letters*, 83, 4026.
- [22] GARDNER, S.T.P. *et al.* *Conductive polymer blends for nontoxic obscurant materials*. En: 23rd Army Science Conference, Orlando FL 2002.
- [23] QIAN, D. *et al.* (2000). *Applied Physics Letters*, 76, 2868.
- [24] DE LA FUENTE, J. <http://www.graphene.com>. 13 abril 2015.
- [25] <http://www.sciencedaily.com/releases/2012/09/120910082304.htm>
- [26] LIU, N. *et al.* (2008). *Advanced Functional Materials*, 18, 1518.
- [27] DOUGLAS, S. (2005). *Journal of Material Chemistry*, 15, 974.
- [28] TUNG, V.C.; Allen, M.J. (2008). *Nature Nanotech*, 4, 25.
- [29] TRUONG, Q.T.; Lee, D.S. (2009). *Nature*, 458, 16.
- [30] YANG, X. Y.; ROUHANIPOUR, X.; MULLEN, H. J. (2008). *Journal of the American Chemical Society*, 4216, 130.



- [31] HUANG, W. *et al.* (2012). *Journal of Material Chemistry*, 22, 7010.
- [32] NJOROGE, Jean L. (2012). “*Atomistic Simulation of Graphene-Polyurethane Nanocomposite for Use in Ballistic Applications*”. Doctoral dissertation, Texas A & M University. <http://hdl.handle.net/1969.1/151360>.
- [33] LEE, J-H. *et al.* (2014). “Dynamic mechanical behavior of multilayer graphene via supersonic projectile penetration”. *Science*, 346.6213, 1092.
- [34] AMERICAN CHEMICAL SOCIETY (2009). *Nano*, 3, 3884.
- [35] <http://www.grafeno.com/grafeno-sensors-moleculares/>
- [36] [http://www.mde.es/areasTematicas/investigacionDesarrollo/sistemas/Monografias del SOPT12](http://www.mde.es/areasTematicas/investigacionDesarrollo/sistemas/Monografias%20del%20SOPT12)

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**APLICACIONES DE LA TERMODINÁMICA A LA
DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PROPIOS DE
EXPLOSIVOS Y PROPELENTES DE USO MILITAR**



APLICACIONES DE LA TERMODINÁMICA A LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PROPIOS DE EXPLOSIVOS Y PROPELENTES DE USO MILITAR

BGR. Eudoro Quiñones Silva.¹

Resumen: *En este artículo se abordan las aplicaciones de la ciencia termodinámica, fundamentalmente de aquellos parámetros que forman parte de la balística interior, a través de la determinación de propiedades fisicoquímicas cuyo conocimiento contribuye ya sea al diseño, fabricación o investigación de los diferentes sistemas de armas. Las aplicaciones termodinámicas a los sistemas tecnológicos militares son múltiples y variadas, por tanto el presente artículo se orienta a la determinación analítica y/o teórica y a la medición experimental de parámetros propios de los explosivos y propelentes de uso militar.*

Palabras claves: *Energía, explosivos, propelentes, calor de explosión, temperatura de explosión, presión de explosión y presión de detonación.*

Abstract: *This article reviews the applications of Thermodynamics Science, fundamentally of those parameters related to Interior Ballistics, through the determination of physicochemical properties useful to the design, fabrication or research of different weapon systems. The applications of Thermodynamics to military technological systems are multiple and varied; thus, the present article is orientated to the theoretical and/or analytical determination and to the experimental measurement of explosives and propellant parameters for military use.*

Key words: *Energy, explosives, propellants, heat of explosion, temperature of explosion, pressure of explosion, and pressure of detonation.*

¹ Ingeniero Politécnico Militar mención Química, Ingeniero Nuclear (JEN, Madrid, España), Posgrado en Proyectos de Centrales Nucleares (Argonne National Laboratory, Illinois, USA).



1. INTRODUCCIÓN

A las aplicaciones de las ciencias les llamamos tecnologías, y dentro de la inmensa cantidad de tecnologías desarrolladas por el ser humano para su uso, encontramos aquellas que se aplican y utilizan en el ámbito militar. Antes de referirnos a algunas de las tecnologías de uso militar, veamos algunos conceptos propios de la ciencia termodinámica.

La palabra termodinámica proviene del griego *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza). La termodinámica se puede definir como la *ciencia de la energía*. Este último concepto es nuevo y de uso frecuente, pero difícil de definir. [4]

Recuerdo en mis tiempos de cadete, durante el proceso de instrucción que culminaría con la revista de reclutas, haber escuchado al instructor decirnos que debíamos realizar los ejercicios de manera muy enérgica, pues la energía lo “tapa” todo, él se refería a que no se notarían los defectos en la ejecución del ejercicio si la realizábamos con mucho despliegue de energía. ¿Sabría dicho instructor el significado del término energía que tan bien aplicaba? Pues bien, hoy podemos decir simplemente que la energía es la capacidad de causar cambios.

Una de las más importantes y fundamentales leyes de la naturaleza es el *principio de conservación de la energía*, que constituye la primera ley de la termodinámica y que nos indica que la energía cambia entre sus múltiples formas, pero permanece constante. Para ilustrar lo anterior, podemos decir que el motor de un tanque transforma la energía química que posee su combustible en energía térmica y luego en energía mecánica de movimiento para dicho vehículo de combate.

Actualmente, la termodinámica se interpreta de manera amplia, incluyendo los aspectos de energía y sus transformaciones, además de la generación de potencia, refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia.

Desde el punto de vista de la termodinámica, entendemos como *sistema* una región del espacio que seleccionamos para su estudio. Cualquier característica del sistema la llamaremos *propiedades* y estas son tan numerosas y diversas como la presión, temperatura, volumen, masa, viscosidad, conductividad térmica, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, resistividad eléctrica, velocidad, elevación, etc. La lista puede ser interminable y aumenta conforme evolucionan las ciencias y tecnologías.

Dentro de la multiplicidad de sistemas, son de nuestro interés los sistemas militares y, dentro de ellos, los sistemas tecnológicos militares, los cuales comprenden los siste-



mas de armas, de comunicaciones y de apoyo. Así, cuando fijamos nuestra atención en un sistema tecnológico militar y simultáneamente lo visualizamos como un sistema termodinámico, podemos integrar ambos en uno solo para realizar su análisis con un determinado fin, como, por ejemplo, el diseño de algunos parámetros, la fabricación de componentes y el mantenimiento de subsistemas. En esta oportunidad centraremos nuestra atención en algunas aplicaciones termodinámicas a los sistemas de armas, específicamente relacionadas con los propelentes y explosivos.

Tanto en el diseño como en la fabricación, adquisición o mantenimiento de estos sistemas de armas es necesario definir requerimientos operacionales, lo cual nos conducirá a establecer mediante cálculo o medición las propiedades termodinámicas de los subsistemas, componentes y elementos que conforman el sistema de armas requerido. Es en esta etapa en que nos encontramos aplicando plenamente las tecnologías que provienen de la termodinámica. Los sistemas de armas están constituidos por múltiples componentes dentro de los cuales encontramos los explosivos y propelentes. Nos enfocaremos en dichos componentes para analizar algunas aplicaciones militares de la termodinámica, aun cuando estas aplicaciones son muy extensas y variadas.

2. LA NATURALEZA DE LOS EXPLOSIVOS

2.1. Características básicas

Los sistemas explosivos existen en un amplio rango de formas físicas. Pueden ser compuestos únicos como el TNT ($C_7H_5N_3O_6$) y RDX ($C_3H_6N_6O_6$), o mezclas de sustancias. Estas mezclas consisten en compuestos químicos o simples elementos, y se encuentran en estado sólido, líquido o gaseoso, además, como sucede frecuentemente con los explosivos comerciales, se pueden presentar como sistemas de dos fases. Los explosivos sólidos o líquidos son llamados a menudo explosivos condensados.

La reacción química más común mediante la cual ocurre un proceso de explosión, es la combustión u oxidación. En dicha reacción un elemento combustible, normalmente carbono y/o hidrógeno, reacciona con un elemento oxidante, normalmente oxígeno o algún halógeno tal como cloro o flúor, transformándose, casi instantáneamente, en grandes volúmenes de gases a alta presión y temperatura.

Los explosivos condensados contienen el oxidante necesario para permitir la reacción en ausencia de aire. En contraste, los combustibles ordinarios tales como la parafina, leña o carbono no son capaces de una combustión rápida a menos que sean finamente divididos y provistos de una gran cantidad de aire o, más específicamente, oxígeno. El corolario de esto es que, dado que los explosivos contienen su propio oxígeno y

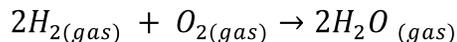


combustible, cuando la combustión ocurre, la cantidad total de energía que liberan es considerablemente menor que la liberada por igual peso de un combustible propiamente tal. Por ejemplo, 1 kg de TNT libera 4.080 kJ de energía mientras que la combustión de 1 kg de petróleo con un adecuado suministro de aire liberará más de 30.000 kJ . La utilidad del explosivo radica más en la velocidad a que es liberada su energía que en la cantidad de esta. [1, 5]

2.2. Mezclas explosivas

Como se ha dicho, los explosivos existen en variadas formas y una manera simple de clasificarlos es en mezclas de compuestos químicos y compuestos químicos únicos, sencillos o individuales.

La mezcla más simple que podemos considerar es la reacción de 2 volúmenes de hidrógeno gaseoso con 1 volumen de oxígeno gaseoso. La mezcla completa ocurre naturalmente y, cuando se inicia con una chispa, se produce una violenta explosión con producción de agua:

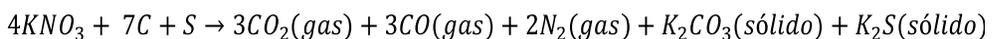


El resultado de esta reacción disminuye el número de moléculas gaseosas y, a primera vista, pareciera contradecir la definición de explosivo la cual se caracteriza por la gran producción de volumen de gas. Sin embargo no menos de 13.260 Joule de calor por gramo de mezcla son liberados por la combustión de hidrógeno. [2] La expansión del agua-vapor producto de la explosión y el calor generado es muy superior al efecto de volumen asociado a la reducción del número de moléculas en la citada reacción.

Aun cuando los explosivos gaseosos del tipo combustible/aire han sido propuestos en la explotación de minas, no son prácticos como explosivos militares, mientras las mezclas condensadas son de uso común. [1] Un ejemplo de mezcla de explosivos condensados es la pólvora negra cuya fórmula moderna es:

Nitrato de potasio (KNO_3)	75 %
Carbón (C)	15 %
Azufre (S)	10 %

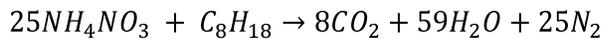
El azufre, junto con ser parte del combustible, reduce la temperatura de encendido de la mezcla. Una aproximación simplificada de la reacción es la siguiente:





Solo un 43 % del explosivo es convertido en productos gaseosos, lo cual es alrededor de un cuarto de lo producido por una cantidad igual de un explosivo moderno eficiente. Por otra parte, los productos sólidos retienen una considerable porción del calor producido en la explosión, lo que reduce la eficiencia de la pólvora negra.

Una mezcla explosiva condensada mucho más eficiente es usada comercialmente como pólvora comprimida o como slurry; su reacción química se puede representar como sigue: [5]

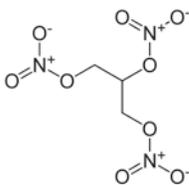


Los productos de esta mezcla explosiva son totalmente gaseosos, dando un resultado muy barato y eficiente.

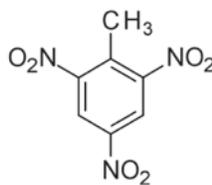
2.3. Compuestos explosivos individuales o únicos

El desarrollo de la industria de la química orgánica, a mediados del siglo XIX, fue estimulado por la búsqueda de tinturas sintéticas que tuviesen un mayor rango de estabilidad y color que aquellas de origen natural. Ello permitió disponer de un vasto rango de compuestos. Muchos de los compuestos coloreados se obtenían con el tratamiento del precursor con mezclas de ácidos nítrico y sulfúrico. Este tratamiento produce compuestos con uno o más nitrogrupos ($-NO_2$), muchos de los cuales son explosivos. El oxígeno para la combustión es aportado por los nitrogrupos ($-NO_2$).

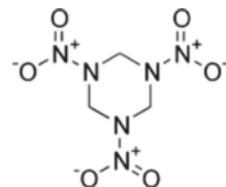
Tales grupos pueden ser atacados en sus átomos de oxígeno, carbono o nitrógeno, en las moléculas y son llamados “nitratos”, “nitro” o “nitramina”, respectivamente. A continuación se muestran ejemplos de explosivos de cada tipo:



Nitroglicerina (NG)



Trinitrotolueno (TNT)



Hexógeno (RDX)

Estas moléculas explotarán violentamente al ser estimuladas apropiadamente mediante una onda de choque generada por un iniciador. La estructura molecular se quiebra con la explosión, liberando inicialmente una masa desorganizada de átomos, estos inmediatamente se recombinan para dar, de preferencia, productos



gaseosos y una gran cantidad de calor denominado Calor de Explosión; este último es, precisamente, uno de los parámetros que mide la termodinámica. Las reacciones pertinentes son las siguientes:

- $C_3H_5N_3O_9 \rightarrow 3CO_2 + 2,5H_2O + 1,5N_2 + 0,25O_2$
Nitroglicerina
- $C_7H_5N_3O_6 \rightarrow 3,5CO + 2,5H_2O + 1,5N_2 + 3,5C(\text{sólido})$
TNT
- $C_3H_6N_6O_6 \rightarrow 3CO + 3H_2O + 3N_2$
RDX

2.4. Desempeño de los explosivos

La efectividad de un explosivo depende de dos factores. El primero es la cantidad de energía disponible en el explosivo y el segundo es la tasa de liberación de dicha energía, al ocurrir la explosión. Para medir la efectividad de los diferentes explosivos se pueden utilizar una variedad de parámetros termodinámicos de desempeño, tales como:

- Calor de explosión
- Temperatura de explosión
- Volumen gaseoso
- Presión de explosión
- Índice de potencia
- Tasa de quemado
- Velocidad de detonación
- Presión de detonación

Estos parámetros se pueden medir experimentalmente o calcular en forma teórica. Los cálculos teóricos, por su mayor simplicidad, son más convenientes y son útiles en estudios comparativos entre explosivos. Justamente estos cálculos teóricos son parte importante de las aplicaciones militares de la termodinámica, objeto de esta monografía. Muchas veces las condiciones precisas de la explosión resultan difíciles de calcular por lo que es necesario recurrir a la experimentación para determinar algunos valores absolutos. A continuación describiremos la metodología o procedimiento para determinar algunos parámetros de desempeño de los explosivos, ya enumerados anteriormente.



- Calor de explosión

Cuando un explosivo es iniciado, ya sea por un proceso de quemado rápido o un proceso de detonación, su energía es liberada en forma de calor (Q). El calor así liberado en forma adiabática (sin intercambio de calor con el medio), se conoce como *calor de explosión*. Para altos explosivos y propelentes en el interior del arma, el calor medido o calculado es bajo condiciones de volumen constante (Q_v). En cambio, para propelentes de cohetes, donde los productos de la combustión pueden expandirse libremente dentro de la atmósfera, es más apropiado usar condiciones a presión constante (Q_p). [1]

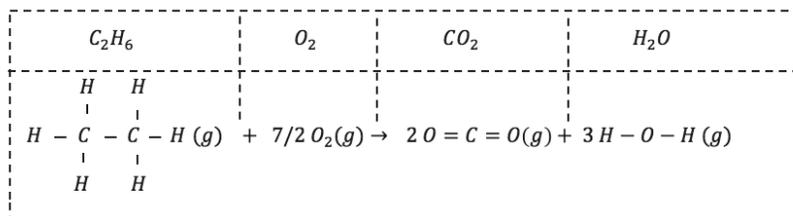
El calor de explosión es simplemente la diferencia entre el calor de formación de los productos de la explosión y el calor de formación del propio compuesto explosivo. Los calores de formación de los gases, tales como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y agua (H_2O), son bien conocidos y se encuentran tabulados, ver por ejemplo la tabla siguiente:

Entalpía o calor de formación a 25 °C, ΔH_f^0 [3]

GAS	ΔH_f^0 (kJ/mol)
CO_2	- 393,52
CO	- 110,53
H_2O	- 285,84

Por otra parte, aunque existen tablas para los calores de formación de diferentes explosivos, estos se pueden calcular a partir del conocimiento de la energía de enlace entre los átomos que conforman la molécula de explosivo, como se ilustra en el ejemplo desarrollado a continuación.

Ejemplo: utilizando tablas con valores de entalpías de enlaces atómicos, determinar el calor de combustión del etano. Mostrando explícitamente los enlaces de productos y reactantes, se tiene: [3]



En los reactivos debemos: romper seis enlaces simples $C-H$ y un enlace simple $C-C$ en el C_2H_6 ; y $7/2$ enlaces en el O_2 . En los productos: formamos cuatro enlaces dobles $C = O$ (dos en cada CO_2) y seis enlaces simples $O-H$ (dos en cada H_2O).



Aplicando la ecuación del balance de energía para la entalpía o calor de reacción (combustión) se tiene:

$$\Delta H_r = \sum(\text{entalpías de los enlaces rotos}) - \sum(\text{entalpías de los enlaces formados})$$

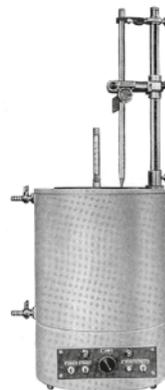
$$\Delta H_r = 6(413 \text{ kJ}) + 348 \text{ kJ} + 7/2(495 \text{ kJ}) - 4(799 \text{ kJ}) - 6(463 \text{ kJ}) = 4558 \text{ kJ} - 5974 \text{ kJ}$$

$\Delta H_r = -1416 \text{ kJ}$, que es el calor o entalpía de combustión del etano y es negativo por ser una reacción exotérmica. Los valores utilizados para los enlaces se encuentran tabulados, por ejemplo, ver la referencia número 3 de la bibliografía.

Otra forma de obtener calores de reacción, y específicamente de combustión, es medirlos empíricamente en una bomba calorimétrica. Una bomba calorimétrica (ver figura N° 1a) es un tipo de calorímetro de volumen constante usado para medir el calor de combustión de una reacción particular. La bomba calorimétrica tiene que soportar la temperatura y presión mientras se está desarrollando la reacción. La reacción se inicia mediante un filamento incandescente activado por una corriente eléctrica.



a) Bomba calorimétrica



b) Calorímetro completo

Figura N° 1: Bomba calorimétrica y Calorímetro. [6]

En diseños más recientes del calorímetro, la bomba entera, presurizada con exceso de oxígeno puro (típicamente a $20 \text{ atm} = 20,26 \text{ bar}$) y con una masa conocida de reactivos, se sumerge bajo un volumen conocido de agua antes de que se encienda por medio de un filamento ardiente. La energía liberada por la combustión aumenta la temperatura de la bomba, de su contenido, y de la chaqueta circundante de agua. El cambio de temperatura en el agua entonces se mide exactamente. Este aumento de temperatura, junto con un factor de la bomba (que sea dependiente de la capacidad calorífica de la bomba), se utiliza para calcular la energía dada hacia el exterior por la



reacción química. Una corrección pequeña se hace para considerar la entrada de energía eléctrica y el filamento ardiente.

La medición del calor de combustión se realiza en dos etapas: determinación de la capacidad calorífica del calorímetro y determinación del calor de combustión de las muestras.

La capacidad calorífica C del calorímetro se determina quemando una cierta cantidad de ácido benzoico p.a., establecido como muestra patrón, con calor de combustión de 26.434 kJ/g . La combustión del ácido benzoico se realiza en presencia de oxígeno presurizado a $16 - 20 \text{ bares}$ ($15,8 - 19,7 \text{ atm}$). Se mide el aumento de la temperatura del calorímetro (ΔT) y se calcula la capacidad calorífica como sigue:

$$C = Q/\Delta T$$

donde:

C = capacidad calorífica ($\text{kJ}/^\circ\text{C}$);

Q = calor liberado (kJ);

ΔT = diferencia de temperatura ($^\circ\text{C}$).

La determinación del calor de combustión se realiza similarmente a la anterior, solo que lo que ahora se quiere medir es la muestra. Para los explosivos, pólvoras, mixtos pirotécnicos y otros materiales energéticos, no es necesario utilizar el oxígeno porque estos materiales tienen su propia fuente de oxígeno y no requieren de oxígeno ambiental para su combustión. En todo caso, si se utiliza oxígeno en la combustión de los materiales energéticos, el calor de combustión es más alto, debido al hecho que la mayoría de los materiales energéticos tienen déficit de oxígeno, es decir, balance de oxígeno negativo. La fórmula que se utiliza para el cálculo es similar a la anterior:

$$Q_{comb} = C (T_{fin} - T_{in}) / m$$

donde:

Q_{comb} = calor de combustión (kJ/g);

C = capacidad calorífica del calorímetro ($\text{kJ}/^\circ\text{C}$);

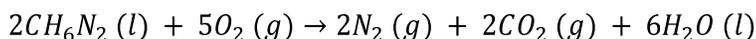
m = masa de la muestra (g);

T_{in} = temperatura inicial ($^\circ\text{C}$);

T_{fin} = temperatura final ($^\circ\text{C}$).



Veamos una aplicación práctica de lo anterior a través de un ejemplo. [3] Consideremos la metilhidracina, CH_6N_2 , un combustible líquido común para cohetes que presenta la siguiente reacción:



Si quemamos **4,00 g** de metilhidracina en una bomba calorimétrica, la temperatura del calorímetro aumenta de **25,00 °C** a **39,50 °C**. En un experimento aparte, se determinó que la capacidad calorífica del calorímetro es de **7.794 kJ/°C**. Para calcular el calor de la reacción para la combustión de un mol de CH_6N_2 en este calorímetro, se procede como sigue:

El calor de la reacción de los 4,00 g de propelente, que es la energía que permite calentar el calorímetro en $\Delta T = 39,50 \text{ °C} - 25,00 \text{ °C} = 14,50 \text{ °C}$, se calcula como sigue:

$$q_r = -C \cdot \Delta T = -(7.794 \text{ kJ/°C})(14,50 \text{ °C}) = -113,0 \text{ kJ}$$

Finalmente, se determina el calor por mol de propelente:

$(-113,0 \text{ kJ}/4,00 \text{ g } CH_6N_2) \cdot (46,1 \text{ g } CH_6N_2/1 \text{ mol } CH_6N_2) = -1,30 \cdot 10^3 \text{ kJ/mol } CH_6N_2$, donde el signo negativo indica reacción exotérmica.

- Temperatura de explosión [1]

Se denomina temperatura de explosión a la temperatura máxima que pueden alcanzar los productos gaseosos de la explosión sin pérdida de calor hacia el entorno (proceso adiabático). A menudo se usa para calcular la capacidad de un explosivo de realizar trabajo.

Para los altos explosivos militares la temperatura de explosión varía en un rango de **2500** a **5000 °C**. Ella puede determinarse fácilmente si se conocen las cantidades, naturaleza de los productos gaseosos y el calor de explosión, mediante la ecuación:

$$T_e - T_a = q/\sum c$$

T_e = temperatura de explosión;

T_a = temperatura ambiente, generalmente **25 °C**;

$\sum c$ = suma de las capacidades caloríficas molares de los productos de la explosión sobre el rango de temperaturas T_a a T_e . Estos valores se encuentran en las tablas termoquímicas. [4]

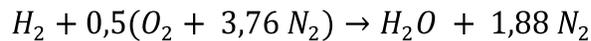


Veamos una aplicación de lo anterior:

Supongamos un estanque rígido, aislado, dentro del cual se quema hidrógeno con una cantidad estequiométrica de aire. Se trata de determinar la temperatura de los productos de combustión.

Para determinar la temperatura de los productos de combustión, suponemos que el estanque es adiabático y de volumen constante, los reactantes y productos son gases ideales, no hay interacción de trabajo y la combustión es completa.

La ecuación de combustión del hidrógeno con cantidad estequiométrica de aire es:



La temperatura final se determina por balance de energía:

$$E_{en} - E_{sal} = \Delta E_{sis}$$

donde:

E_{en} = energía de entrada;

E_{sal} = energía de salida;

ΔE_{sis} = variación de energía del sistema, siendo esta última igual a cero por cuanto se trata de un sistema cerrado adiabático sin intercambio de calor ni de trabajo con el medio, luego:

$$E_{en} = E_{sal}$$

$$\text{Esto implica } \sum N_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0 - P\nu)_p = \sum N_r (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0 - P\nu)_r$$

donde:

N_p = número de moles de cada producto;

N_r = número de moles de cada reactivo;

\bar{h}_f^0 = entalpía de formación por mol de cada producto;

\bar{h} = entalpía por mol de cada producto a la temperatura de explosión;

\bar{h}^0 = entalpía por mol de cada producto a 25°C;

ν = volumen molar;

P = presión;



$()_p$ = relativo a los productos;

$()_r$ = relativo a los reactivos.

Ya que tanto los reactantes como los productos son gases ideales, las energías internas y entalpías solo dependen de la temperatura y Pv se puede reemplazar por $R_u T$, donde R_u es la constante universal de los gases, cuyo valor es $8,314 \text{ kJ/kmol K}$, resultando:

$\sum N_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h}_{Tp} - \bar{h}_{298K} - R_u T)_p = \sum N_r (\bar{h}_f^0 - R_u T)_r$, ya que los reactantes están a la temperatura estándar de 25°C . De las tablas termoquímicas, se obtiene. [4]

Sustancia	\bar{h}_f^0 kJ/mol	\bar{h}_{298K} kJ/mol
H_2	0	8,468
O_2	0	8,682
N_2	0	8,669
H_2O	-241,82	9,904

De esta manera:

$$\begin{aligned}
 & (1 \text{ mol de } H_2O) \left(-241,820 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + \bar{h}_{H_2O} - 9,904 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot T_p \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \\
 & + (1,88 \text{ mol de } N_2) \left(0 + \bar{h}_{N_2} - 8,669 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot T_p \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \\
 = & (1 \text{ mol de } H_2) \left(0 - 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) + (0,5 \text{ mol de } O_2) \left(0 - 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \\
 & + (1,88 \text{ mol de } N_2) \left(0 - 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right)
 \end{aligned}$$

Resulta:

$$\bar{h}_{H_2O} + 1,88 \bar{h}_{N_2} - 23,94 \cdot 10^{-3} \cdot T_p = 259,248 \text{ kJ}$$

Ahora T_p se obtiene por interpolación entre valores cercanos:

A 3050 K $\bar{h}_{H_2O} + 1,88 \bar{h}_{N_2} - 23,94 \cdot 10^{-3} \cdot T_p = 260,163 \text{ kJ}$ valor más alto, luego bajamos la temperatura,

A 3000 K $\bar{h}_{H_2O} + 1,88 \bar{h}_{N_2} - 23,94 \cdot 10^{-3} \cdot T_p = 255,089 \text{ kJ}$ valor más bajo, luego se interpola entre ambos.



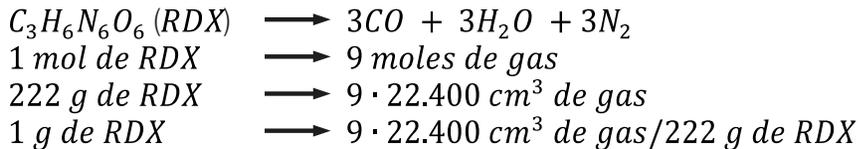
Finalmente, por interpolación $T_p = 3045 K$

- Volumen gaseoso

El volumen de los productos gaseosos de la explosión (V) generalmente se calcula a la presión de 1 bar ($1 \text{ bar} = 1,013 \text{ atm} = 105 \text{ Pa}$) y temperatura de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (273 K); su valor fluctúa entre 700 y 1000 cm^3 para los explosivos militares.

La ecuación de combustión nos entrega el número de moles gaseosos producidos y ya que el volumen de un mol de cualquier gas ocupa el mismo volumen bajo condiciones estándar (22.400 cm^3), el valor del volumen se obtiene como sigue:

Cálculo del volumen, V , para la detonación de RDX, dada la siguiente reacción:



$$V = 908 \text{ cm}^3/\text{g}$$

- Presión de explosión

La presión de explosión (P_e) es el máximo de presión estática que puede alcanzarse cuando un peso dado de explosivo es quemado en un vaso cerrado de volumen fijo. Estas presiones alcanzan valores tan altos que la ley de los gases ideales no es aplicable y es necesario introducir el co-volumen α , (volumen de la sustancia una vez eliminados los espacios intermoleculares) para corregir el volumen:

$$P_e (V^* - \alpha) = nR_u T_e$$

donde:

V^* = volumen del vaso de prueba cerrado;

n = número de moles de gas producido por gramo de explosivo;

R_u = constante universal de los gases ($8,314 \text{ kJ/kmol K}$).

Veamos cómo se determina la presión de explosión para el quemado de 10 g de RDX en una bomba de 10 cm^3 , dado que $n = 0,045$ moles por gramo de RDX, $T_e = 4255 \text{ K}$ y $\alpha = 0,54 \text{ cm}^3$.



Aplicando la fórmula dada: $P_e = nR_u T_e / (V^* - \alpha)$

$$P_e = 0,45 \text{ mol} \cdot 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \cdot \frac{4255 \text{ K}}{\left\{ (10 - 0,54) \text{ cm}^3 \cdot \left(\frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right) \right\}} = 1682,79 \cdot 10^3 \text{ kPa} = 17 \text{ kbar}$$

aproximadamente.

Como se verá más adelante, las presiones de explosión son un orden de magnitud menores en comparación con las presiones de detonación.

- Velocidad de detonación

Es la velocidad de propagación de la onda frontal (de choque) de la detonación a través de una columna de explosivo particular.

La velocidad de detonación se determina experimentalmente, iniciando una columna de explosivo, y midiendo el tiempo de propagación de la onda de choque entre dos sensores (partida y parada), puestos a una distancia conocida (normalmente 7-10 mm). En la literatura correspondiente hay muchos intentos para calcular la velocidad de detonación en base de algunos parámetros. A continuación se presentan dos de ellas como ejemplo: [1]

- $V_d = 64,4 \sqrt{2(\gamma^2 - 1)\Delta H_r} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

donde:

V_d = velocidad de detonación (m/s);

γ = relación de calores específicos (C_p/C_v);

ΔH_r = calor de reacción (kcal/kg).

- $V_d = 430 \sqrt{nT_d} + 3500(\Delta - 1) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$, fórmula de Marshall, donde:

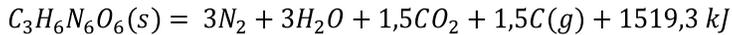
V_d = velocidad de detonación (m/s);

n = número de moles de productos gaseosos por gramo de explosivo;

T_d = temperatura de detonación en K;

Δ = densidad de carga en g/cm³, masa de explosivo/volumen entero donde esta masa se encuentra (prensada o moldeada).

Esta última fórmula permite calcular la velocidad de detonación del RDX, considerando una densidad de carga de **1,76 g/cm³**, una temperatura de explosión de **3380 °C (3653 K)**, y la reacción de descomposición química siguiente:



Atendiendo a esta reacción, el número de moles de productos gaseosos es $n_p = 9 \text{ moles}$ y el peso molecular del RDX es $222,1 \text{ g/mol}$; entonces se tiene $n = 9/222,1 \text{ moles/gramo de explosivo} = 0,04 \text{ moles/g}$

$$\text{Finalmente: } V_d = 430 \sqrt{0,04 \cdot 3653 + 3500(1,76 - 1)} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_d = 7858 \text{ m/s}$$

- Presión de detonación

La presión dinámica máxima en el frente de choque es llamada presión de detonación, o la presión generada en el centro de la detonación del explosivo. Dicha presión se determina experimentalmente, pero en la literatura se pueden encontrar algunas fórmulas para su cálculo, por ejemplo: [1]

$$P_d = \frac{\Delta V_d^2}{4} [Pa]$$

Calculemos la presión de detonación del RDX, para la velocidad de detonación calculada anteriormente. Se tiene:

$$P_d = 1,76 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{7858^2 \text{ m}^2/\text{s}^2}{4 P_{atm}} = 27,169 \text{ MPa} = 272 \text{ kbar}, \text{ aproximadamente.}$$

Nótese que esta presión de detonación es de un (1) orden de magnitud superior a la presión de explosión (17 kbar) calculada.

2.5. Programas

Existen variados programas o códigos computacionales que han sido desarrollados para facilitar el cálculo de los parámetros termodinámicos propios de cada materia energética química (explosivos, propelentes y materiales pirotécnicos). Ellos se pueden encontrar en Internet o en DVD adjuntos a publicaciones relacionadas con estos temas. Uno de ellos es el código conocido por su sigla IBHVG2 (Interior Ballistics of High Velocity Guns, versión 2). [6]

IBHVG2 es uno de los códigos computacionales más ampliamente utilizados en la comunidad dedicada al estudio y desarrollo de la balística interior. De operación muy simple, IBHVG2 fue desarrollado para describir diferentes eventos balísticos como un



conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que son resueltas en el tiempo. En la figura N° 2 se esquematiza el proceso de cálculo que utiliza este programa. Con una suficiente descripción del arma y de su propelente, el programa puede simular el quemado del iniciador y del propelente, mientras registra una serie de propiedades termodinámicas que incluyen la presión de los gases, temperatura de la cámara de combustión, aceleración y velocidad del proyectil, y la fracción de masa de cada propelente no quemado. Esto es muy útil para el diseño de propelentes, donde se pueden realizar simulaciones consecutivas hasta lograr los parámetros deseados para un arma específica.

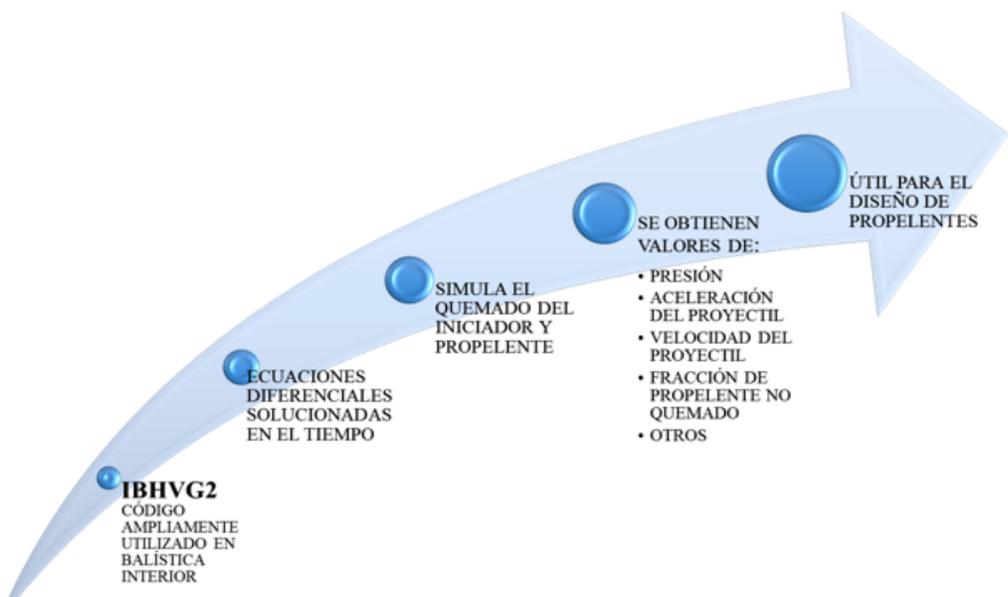


Figura N° 2: Proceso de cálculo del programa IBHVG2.

3. CONCLUSIONES

3.1. El empleo de los fundamentos de la termodinámica en la determinación de las propiedades fisicoquímicas de las materias energéticas químicas resulta esencial en su aplicación al diseño, desarrollo, análisis y fabricación de dichas materias energéticas.

3.2. La determinación de las propiedades fisicoquímicas se puede realizar obteniéndolas de tablas, calculándolas mediante el uso de algoritmos con ayuda de códigos computacionales y en forma experimental.

3.3. El cálculo de los parámetros termodinámicos juega un papel importante en la formulación de un explosivo militar, ya que al tener una estimación correcta de los



mismos, podemos fabricar un material con energía específica, composición efectiva y estable para ser utilizado.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BAILEY, A. & MURRAY, S. G. (1989). *Explosives, propellants & pyrotechnics*.
- [2] MELÉNDEZ INFANTE, Arturo (2000). *Termodinámica para ingenieros*.
- [3] BROWN, Lemay Bursten (2004). *Química: la ciencia central*.
- [4] ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. (2008). *Termodinámica*.
- [5] ORBOVIC, Nikola B. (2011). *Explosivos, propelentes y pirotecnia*.
- [6] ANDERSON, Ronald D.; FICKIE, Kurt D. (1998). *Army ballistic research lab aberdeen proving ground md*.





ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR
Avda. Valenzuela Llanos N° 623
La Reina, Santiago, Chile
www.acapomil.cl