

3. QUÍMICA

3.1

Campos de interés de la ingeniería química militar

Por el Coronel (R) Ingeniero Militar Carlos Hugo Trentádue*

Resumen

Con este artículo buscaremos trazar un panorama de los campos de acción en que concentraremos la atención en el Centro de Estudios sobre Prospectiva Tecnológica Militar “Grl MOSCONI” referidos a la ingeniería química militar. En síntesis, la búsqueda será desarrollada sobre productos definidos como de interés, los procesos tecnológicos involucrados en su fabricación y los mercados, tanto desde el punto de vista de la oferta como de la demanda. Las áreas generales serán los materiales energéticos, los temas de almacenamiento de energía y otras áreas de tecnología química. Referente a los materiales energéticos, nos dedicaremos en particular a los propulsores, explosivos y pirotecnia, tanto de uso militar como en aplicaciones de doble uso. Con respecto a los temas de almacenamiento de energía partiremos del estado del arte en este campo y nos focalizaremos en temas de almacenamiento químico de energía. Análogamente, seguiremos los desarrollos de supercapacitores y de medios de cosecha de energía. Referente a los otros temas de tecnología química y atendiendo a demandas específicas de cámaras industriales del sector, veremos los avances en tecnologías vestibles, en particular los desarrollos en textiles, su integración con sensores incorporados en los mismos y su aplicación al campo militar, tanto uniformes como medios de protección individual y colectiva, y, siempre dentro de este campo, veremos elementos relacionados con desarrollos en tecnología de alimentos que sean de interés de las fuerzas.

Finalmente, seguiremos los desarrollos de las armas de destrucción masiva, en particular los sistemas de detección, profilaxis, protección y remediación de los efectos que su empleo pudiese tener.

Palabras clave: Ingeniería química militar; materiales energéticos; propulsores; explosivos; pirotecnia; almacenamiento de energía; baterías; supercapacitores; cosecha de energía; pila de combustible; tecnologías vestibles; uniformes; textiles; tecnología de alimentos; armas de destrucción masiva; protección contra ADM; defensa contra ADM.

Introducción

La defensa nacional y la industria química comparten algunas características comunes. Ambas son actividades necesarias para el desarrollo de una nación y también ambas son poco

populares, dado que en las sociedades modernas, parafrasando a David Hume,⁵⁷ se cumple que “los hombres no son capaces de desarraigar, en ellos o en otros, la estrechez del alma que les hace preferir lo presente a lo remoto”. Es decir, esa característica que nos impide desarrollar nuestras actividades presentes sin comprometer el futuro de las próximas generaciones, y es así que todos aceptamos los beneficios de vivir en paz y el fácil acceso a productos que hoy consideramos esenciales para nuestro estilo de vida, pero fácilmente criticamos los costos que ellos nos imponen.

Nuevas sustancias y compuestos químicos, es decir nuevas moléculas, polímeros y mezclas definidas son sintetizadas en laboratorios alrededor del planeta a un ritmo de varios millones cada año, y el Chemical Abstract Service asigna en el orden de 15.000 nuevos registros diariamente⁵⁸. Estas sustancias, existentes, recientemente creadas y las próximas a aparecer, sus propiedades fisicoquímicas, toxicológicas, su impacto ambiental, sus métodos de fabricación, su cadena de suministros, etcétera, son los campos de acción de químicos e ingenieros químicos.

En su marco más general, las ciencias químicas se ocupan de sustancias y de sus transformaciones, tanto químicas como físicas, y buscan comprender los mecanismos precisos de estas transformaciones para construir modelos predictivos que permitan el diseño de procesos y el control de los mismos, para producir los compuestos de interés en escalas que tengan valor comercial y provean un beneficio para la sociedad.

Dentro de su campo de interés, los científicos químicos también tratan de comprender las propiedades biológicas de las sustancias naturales y artificiales. Esto incluye no solo el descubrimiento y comprensión de las estructuras moleculares detalladas de todas las sustancias en los seres vivos, sino también las transformaciones que ocurren en los procesos de la vida. Buscan entender las propiedades de sustancias aisladas y extender ese conocimiento a la interacción en sistemas organizados, desde una célula viva hasta el complejo sistema poliquímico que es la Tierra en sí misma.

Los ingenieros químicos se ocupan del diseño, modelización, *scaling-up* y la construcción de grandes sistemas químicos y procesos para producir sustancias de interés. Esto requiere el dominio de las transformaciones químicas y físicas de la materia. Ellos aportan las herramientas cuantitativas, analíticas y computacionales para el diseño y desarrollo de operaciones químicas, sistemas y procesos.

La evolución de la ingeniería química como una disciplina distinta dentro de las ciencias químicas se produjo, en gran medida, a lo largo del siglo XX, cuando fue cambiando junto con los avances tecnológicos que posibilitaron la aparición de nuevos equipos de producción y metodologías de control.

Como otros campos de la ciencia y tecnología, la ingeniería química ha cambiado sus alcances en el mundo a partir de fines del siglo pasado. La investigación química básica comenzó a solaparse con la ingeniería química en una medida sin precedentes. Sin duda, la química e ingeniería química han alcanzado un alto nivel de integración a través de todo el espectro de las ciencias químicas.

La ingeniería química aplicada al área de la defensa tiene las mismas características generales que el resto de las ingenierías, pero debe aplicar su mirada en particular sobre campos que le son de particular, y en algunos casos, de exclusivo interés.

Considerando que siempre orientaremos nuestra búsqueda a tres aspectos de cada tecnología: producto, proceso y mercados, podemos clasificarla en los siguientes grupos:

57. "...Men are not able radically to cure, either in themselves or others, that narrowness of soul, which makes them prefer the present to the remote..."
Hume, D., (2001), Tratado de la naturaleza humana, Libros en la Red, versión electrónica, Diputación de Albacete, pág. 381.

- > Descubrimiento: los principales descubrimientos o avances en las ciencias químicas durante los últimos años, en especial, aquellos que podamos catalogar como el estado del arte.
- > Interfaces: las interfaces que existen entre química/ingeniería química y áreas tales como energía, biología, ciencias ambientales, ciencias de los materiales, tecnología de alimentos, medicina y física.
- > Desafíos: los grandes retos que existen hoy en las ciencias químicas.
- > Equipamiento: equipos e infraestructura que se requieren para permitir que el potencial de futuros avances en las ciencias químicas pueda llevarse a cabo.

Considerando lo expuesto, las grandes áreas donde concentramos nuestro accionar son:

- > *Materiales Energéticos*, es decir, propulsores, explosivos, composiciones pirotécnicas y combustibles. Sin descartar totalmente los combustibles, nuestro centro de gravedad estará aplicado a los otros tres campos, por ser de gran interés tanto para la defensa como para la seguridad y por sus aplicaciones industriales en los campos de la construcción y minería.
- > *Almacenamiento de energía*, es decir, todos los tipos de acumuladores y dispositivos para cosechar y almacenar energía.
- > *Otras áreas de tecnología química*, como las Tecnologías vestibles y, dentro de estas, aquellas relacionadas con la vestimenta del personal y la Tecnología de alimentos.
- > *Armas de destrucción masiva, desarme y no proliferación*. Si bien este no es un campo exclusivamente relacionado con la química, por las razones expuestas en la introducción, referentes a la interacción entre las ciencias biológicas y los procesos químicos que caracterizan la vida, también le dedicaremos nuestra atención.

Materiales Energéticos

Desde la aparición de la pólvora negra, el ser humano ha usado las propiedades químicas de algunos materiales para multiplicar la energía puesta a su disposición. En particular, en el campo militar, el uso de la “lanza de fuego” en el sitio de la ciudad amurallada de De’an en 1132 en China⁵⁹ es uno de los primeros registros escritos del empleo bélico de esta sustancia que alguna literatura china llamaba *huo yao*, “droga de fuego”, cuya fórmula ya aparecía en un texto de la dinastía Song alrededor de 1044⁶⁰.

Desde entonces, tuvieron que transcurrir más de seiscientos años para que a finales del siglo XIX se produjese un avance disruptivo en las tecnologías de armamentos, alimentado por dos grandes fuerzas motoras: por un lado, las grandes mejoras en propulsores (las pólvoras sin humo, tanto mono como polibásicas) y la aparición de los altos explosivos (ácido pícrico - 2,4,6-trinitrophenol y TNT) y, por el otro, la aplicación de métodos de producción altamente industrializados.

De manera general, los materiales energéticos se refieren a sustancias que almacenan una gran cantidad de energía química que puede ser liberada, que se clasifican como propulsores, explosivos y combustibles. En el contexto de este trabajo nos concentraremos en los dos primeros.

La primera pólvora “sin humo” fue descubierta por Paul Vieille en 1884 y puesta en servicio por Francia bajo el nombre de Poudre B a partir de 1886, apenas dos años después de su descubrimiento. Asimismo, desde 1894 los rusos comenzaron a usar ácido pícrico para llenado de munición explosiva. Ambos descubrimientos fueron rápidamente adoptados por

58. El CAS es un órgano de la American Chemical Society, que actualmente tiene registrados 116 millones de sustancias y 66 millones de secuencias de proteínas y ácidos nucleicos.

59. Chase, K., (2003), *Firearms: A Global History to 1700*, Cambridge University Press.

60. Ebrey, P., (2010), *The Cambridge Illustrated History of China* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.

casi todos los países. Si bien el TNT había sido descubierto en 1863 por Julius Wilbrand⁶¹, solo comenzó a ser usado para carga de munición en 1902 por Alemania.

Al producirse la Primera Guerra Mundial, estas innovaciones posibilitaron el abastecimiento a las fuerzas armadas combatientes de tal manera que les permitieron desarrollar operaciones a una escala pocas veces vista en el pasado, con alcances de armas mucho mayores y poderes destructivos impensables con los medios disponibles hasta ese momento.

Nuevamente, como ya había sucedido en el pasado con cada progreso científico y tecnológico aplicado al campo militar, esos armamentos y materiales impusieron la adaptación de la táctica y, en algunos casos, de las estrategias para lograr el mejor aprovechamiento de los nuevos medios técnicos. Y quienes no lo hicieron tuvieron que pagar un gran precio, normalmente en vidas humanas, hasta que finalmente se adaptaron al nuevo ambiente de combate o desaparecieron.

El desarrollo de la química en el siglo XX permitió muchos avances tecnológicos importantes que condujeron a la obtención de mayores rendimientos de los materiales existentes y al desarrollo de nuevos productos energéticos de baja sensibilidad a la iniciación accidental.

Este último punto, consistente con la reducción de riesgos en el manipuleo y operación de las herramientas de la profesión militar, llevó a la aparición de la llamada Munición de Baja Vulnerabilidad (LOVA - *Low Vulnerability Ammunition*), como la Composición B (60 % RDX/40 % TNT); los explosivos de ligante plástico, (PBX - *Plastic Bonded Explosives*, generalmente con altos porcentajes de RDX/HMX, en una matriz plástica inerte) y explosivos para municiones insensibles (IM - *Insensitive Munition* o también, MURAT - *Munitions à risques atténués*).

Pero pese a esos avances casi nada sucedió en el campo de los materiales energéticos hasta fines de siglo, cuando hacen su aparición un conjunto de nuevas sustancias energéticas, que fueron sintetizadas y pudieron ser fabricadas. Y desde entonces continúa la búsqueda de nuevas sustancias, habiéndose obtenido muy recientemente compuestos tales como los iones N5+ y N5- e intermediarios del hidrógeno metálico a escala laboratorio.

Si bien los cambios y tendencias no han sido los únicos desarrollos en el campo de la propulsión, en el marco de los materiales energéticos, focalizaremos nuestra atención en alguno de los más notables de ellos aparecidos en los últimos años, como el TEX, el FOX 7 y el 12, el ADN y otros compuestos que tienen la capacidad de revolucionar el campo de los energéticos militares, sin olvidar lo que se mencionó en los primeros párrafos respecto de que cada día aparecen nuevas moléculas que pueden ser el equivalente a la pólvora de Vieille o la nitroglicerina de Sobrero y revolucionar el campo.

Además de las sustancias en sí, avanzaremos en la descripción de los explosivos termo-báricos, las composiciones combustible-aire, los materiales reactivos y los propulsantes avanzados para armas. Para un ejemplo del estado del arte en este campo recomendamos ver el Documento 010816/00 "Tendencias en Materiales Energéticos" (propulsantes Y explosivos), producido por el Centro de Estudios de Prospectiva Tecnológica Militar "General Enrique Mosconi" durante el corriente año.

Almacenamiento de energía

La energía ha sido y es un factor fundamental de las operaciones militares. Desde el alimento para los caballos del General San Martín para el cruce de los Andes hasta el combustible necesario para mover las tropas en los campos de operaciones, el disponer de energía es un prerequisite para el uso del instrumento militar.

61. Julius Bernhard Friedrich Adolph Wilbrand (1839 – 1906) fue un químico alemán que lo propuso comocolorante amarillo. Recién en 1891, Carl Haesslermann, otro químico de la misma nacionalidad, describió sus propiedades explosivas.

La energía operacional es definida en la literatura como “la energía necesaria para el entrenamiento, movimiento y soporte de las fuerzas militares y también de las plataformas de armas para la ejecución de operaciones militares”. Incluye la energía utilizada por buques, aeronaves, vehículos de combate y generadores tácticos.

Esta definición no especifica, aunque incluye, los importantes requerimientos de energía eléctrica que demandan los sistemas electrónicos que son usados, transportados o incluso “vestidos” en la terminología actual, por los combatientes individuales.

La secuencia histórica de energéticos de uso militar incluye la eólica, el esfuerzo humano y el carbón, todos ellos para las operaciones navales, con el agregado de la tracción animal en las operaciones terrestres y el uso casi exclusivo de los combustibles fósiles (es decir carbón, gas natural, petróleo y sus derivados), en particular los líquidos derivados del petróleo en casi todas las operaciones militares desde la segunda guerra mundial.

Los combustibles fósiles, en particular los líquidos derivados del petróleo son hoy el principal, energético utilizado en las operaciones militares, los temas de logística de la cadena de producción, almacenamiento, transporte y utilización siguen los métodos tradicionales utilizados en los mercados de combustible con la sola diferencia del análisis de riesgos y de la ponderación del costo de falla. El costo de falla del energético de uso militar no se mide en dólares por unidad de energía; el costo de falla es directamente la pérdida de la operación militar, la muerte y la derrota.

Como expresásemos en la introducción, el alcance de nuestro accionar en el Centro en el área de energía estará especialmente dirigido a los temas de su almacenamiento y también, en aquellos casos en que no se puedan separar, en la producción, particularmente con sistemas de cosecha.

Las baterías son hoy la base del suministro de energía eléctrica para alimentar el equipamiento electrónico individual, pero la adquisición, almacenamiento, distribución, y eliminación de una gran cantidad de diferentes tipos de pilas presenta desafíos para la gestión logística y se añade a los riesgos inherentes del combate.

Actualmente, para una operación de tres días, un equipo de apoyo de fuego desmontado, de organización equivalente a la nuestra⁶², requiere nueve kilos de baterías, solo para el equipamiento colectivo. El radioperador de una sección de infantería o de la subunidad debe llevar siete kilos. A ello deben sumarse los requerimientos de dos kilos por individuo y los requerimientos del puesto de comando que necesita en el orden de treinta y cinco kilos. Fuerzas armadas de países con mayor equipamiento duplican estos valores.

A modo de ejemplo, de acuerdo con la literatura, la gran demanda de baterías durante la operación *Iraqi Freedom* durante la segunda Guerra del Golfo en 2003, con una duración de 43 días, superó la capacidad de fabricación de las mismas en Estados Unidos y los suministros se habrían agotado si las operaciones de combate hubiesen durado otros 30 días⁶³. Debido a la escasez de baterías primarias, es decir, aquellas que no son recargables, las tropas fueron instruidas para utilizar baterías recargables, que normalmente solo son empleadas para entrenamiento, por su menor densidad de energía. Para apoyar las operaciones, estaba previsto que las unidades recibirían vehículos con generadores para efectuar la recarga, pero ninguno realmente fue utilizado durante su desarrollo.

Hoy las Fuerzas Armadas están buscando fuentes de energía alternativa, por ejemplo, paneles solares pequeños y flexibles que podrían ser doblados y guardados en la mochila de un sol-

62. *DTA Report 368* [Informe de la Agencia de Tecnología de Defensa] (2013). Nueva Zelanda. <http://www.dta.mil.nz/wp-content/uploads/New-Zealand-Army-Dismounted-Soldier-Power-requirements.pdf>

63. *Meeting the Energy Needs of Future Warrior*, (2004), Committee of Soldier Power/Energy Systems, NRC, National Academies Press.

dado. En condiciones de gran insolación, como en operaciones en áreas desérticas, los paneles solares se pueden utilizar para recargar baterías o incluso operar radios. Estos mismos sistemas pueden ser usados para apoyo a la comunidad en acciones durante emergencias y desastres.

Como si esto no fuese un indicador preocupante, el programa del *Future Infantry Soldier Technology* (FIST), del Reino Unido, parte de la estimación que los requerimientos de energía eléctrica del soldado de infantería del futuro serán diez veces superiores a los actuales. Las previsiones son que por ahora las tecnologías a usar seguirán siendo las basadas en baterías de ion de litio avanzadas hasta que otras tecnologías como las pilas de combustible y los generadores a pila de combustible lleguen a ser competitivos.

Baterías

La tendencia en baterías se orienta hoy mayoritariamente hacia la química de litio (para baterías descartables y recargables). Esta tendencia es también impulsada por innumerables aplicaciones comerciales y el potencial de la alta energía específica disponible, como podemos ver en la Tabla 1, donde claramente observamos la diferencia entre los valores de energía específica que se obtienen actualmente y los teóricamente alcanzables. Dos excepciones que es necesario destacar son las baterías zinc-aire, que es una batería primaria (descartable) que funciona de manera similar a una pila de combustible, y la batería litio-aire, que está actualmente en las primeras etapas de desarrollo y puede funcionar como una batería primaria o secundaria.

Las tecnologías que hoy se muestran como promisorias y podrían considerarse el estado del arte son:

TABLA 1 - TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS

Química involucrada	Energía específica real Wh/kg	Energía específica teórica Wh/kg
Baterías primarias		
LiSO ₂	190	1.175
LiMnO ₂	220	1.000
Li(CF) _x	370 - 600	2.180
Baterías secundarias		
Polímero - Li	130 - 200	750
Ion Litio	108	750
LiCoO ₂	140 - 158	
Zn - Aire	280 - 300	1.370
Li - Aire	800	5.210 (incluye oxígeno)

Sería deseable que las baterías secundarias pudiesen entregar tanta energía como las primarias, pero en la práctica y con los niveles tecnológicos actuales, las baterías recargables entregan alrededor del 75 por ciento de las primarias.

Las tecnologías como las de polímero de litio, polímero de iones de litio e iones de litio pueden mejorarse sustancialmente mediante el desarrollo de nuevos electrolitos. Además, la ingeniería de materiales de electrodo más activos y envases innovadores pueden

resultar en mejoras importantes en energía almacenada sin sacrificar las otras características exigidas por los usuarios. Para las baterías principales y secundarias, pruebas de nivel celular indican que las baterías se pueden mejorar por un factor de dos o más a 300 vatios por kilo en cinco a diez años, reduciendo peso y volumen.

Pilas de combustible

Otro grupo de tecnologías de interés en este campo son las pilas de combustible, también cono-

cidas como celdas o células de combustible. Sus atributos principales son la alta eficacia de conversión, la baja firma acústica y térmica (en algunos modelos) y una amplia gama de tamaños.

No son tan apreciadas en la práctica para su empleo operacional porque requieren combustibles que no están normalmente en la cadena logística militar.

TABLA 2 - CELDAS DE COMBUSTIBLE CONSIDERADAS PARA USO MILITAR

Tipo	Combustible	Peso (kg)	Potencia (W)	Tiempo de arranque (min)	Peso para misión de 72hs
DMFC	Metanol/agua	1,18	20-25	10	2,6
RDMFC	Metanol/agua	1,6	50	30	18
SOFC	Propano	2,6	50	30	6,2
DMFC	Metanol/agua	15	300	10	
RMFC	Metanol	16,3	300	30	
SOFC	Propano	16	300	15	

En el mediano plazo, las tecnologías básicas asociadas con los tipos de pilas de combustible mostradas en la Tabla 2 ya habrán sido sometidas a un mayor desarrollo. Es de esperar que, aparte de la reducción en el costo de fabricación producto de la curva de aprendizaje, el avance más significativo que se puede esperar es el desarrollo de un sistema de *reforming* tolerante al azufre

que podría integrarse en estas células de combustible, para alimentarla con un combustible tipo los de aviación (JP). Esta es una opción atractiva pues, por un lado, ya existe una cadena logística de los JP y, por el otro, se debe recordar que el gas propano y los combustibles JP tienen aproximadamente la misma energía específica, pero que el propano líquido tiene aproximadamente la mitad de la densidad de energía en vatios por litro que los JP. Y ambos tienen aproximadamente 2,25 veces la energía específica de metanol, una diferencia que se incrementa cuando es necesario utilizar una mezcla de metanol/agua para la operación en temperaturas más altas.

Supercapacitores

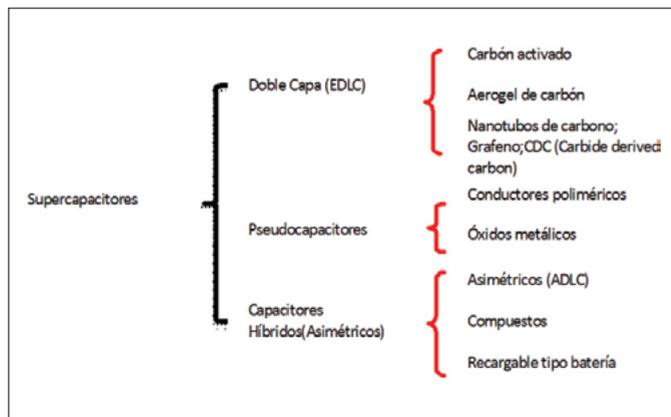
Otra tecnología conectada con el almacenamiento de energía son los supercapacitores (también llamados ultracapacitores o supercondensadores en alguna literatura).

El supercapacitor (formalmente capacitores electroquímicos -CE-), tiene varias características que lo hacen atractivo para ser aplicados en distintos tipos de vehículos, tales como la rapidez de la carga, los ciclos largos de carga-descarga y un intervalo de temperaturas de operación amplio.

Sin embargo, todavía hay algunos problemas asociados a los sistemas de CE, como ser, la relativamente baja densidad de energía y su alto costo de fabricación.

Un capacitor convencional, también conocido como condensador o capacitor electrostático, es un dispositivo de almacenamiento de energía que consiste en dos placas conductoras

FIGURA 1 - TIPOS DE SUPERCAPACITORES



de la electricidad (a veces llamados electrodos), que están separados por una capa dieléctrica. Los materiales dieléctricos son aislantes, ejemplo de los cuales son la cerámica, el vidrio, el papel, el plástico y el óxido de aluminio (Al_2O_3).

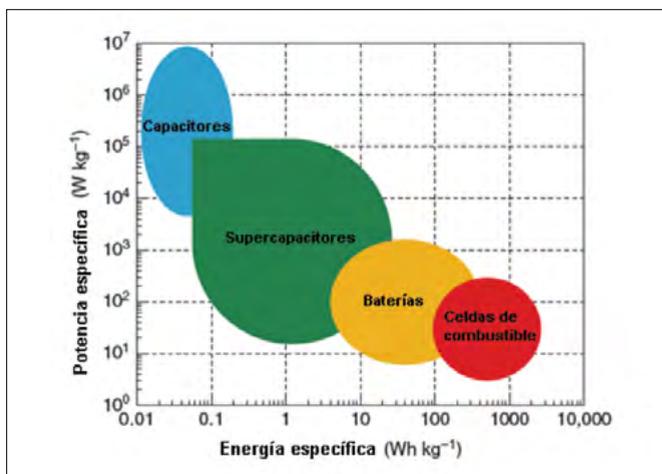
El proceso de carga de los condensadores es simple. Cuando las dos placas conductoras están conectadas a una fuente de alimentación externa, que induce una diferencia de potencial entre ellas, en una de las placas se acumulan cargas positivas y en la otra se acumulan cargas negativas. Las cargas se mantienen en sus correspondientes placas, aun después de la desconexión de la fuente de alimentación externa; este es el estado de carga de un capacitor. Durante la descarga, el capacitor se descarga sobre una carga resistiva conectada, para de esta forma entregar su energía almacenada.

Sin embargo, las aplicaciones para estos capacitores convencionales estaban limitadas por su baja capacidad de almacenar energía, dado que las cargas se alojan en la superficie y por ello eran función de esta.

La búsqueda de un nuevo material de mayor superficie específica dio lugar a un nuevo tipo de capacitores llamado supercapacitor. A diferencia de los capacitores convencionales, los electrodos de estos se componen normalmente de materiales porosos de gran superficie, como los nanotubos de carbono (estructura de carbono con átomos en arreglo hexagonal dispuestos en un plano aislado de grafito, de forma tubularcilíndrica) y un separador que puede ser sólido o líquido, y se generan, por lo tanto las interfaces electrodo / electrolito. Estas interfaces, llamadas interfaces eléctricas de doble capa, tienen una mayor superficie que los capacitores dieléctricos y por lo tanto pueden almacenar más carga (energía).

Los ES poseen ventajas que complementan las muchas deficiencias de otros dispositivos de almacenamiento de energía, por lo que han despertado gran interés. Los ES son capaces de proveer densidades de potencia más altas que las baterías y celdas de combustible y mayores densidades de energía que los capacitores convencionales. La Figura 2⁶⁴ muestra un diagrama de

FIGURA 2 - DIAGRAMA DE RAGONE DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA



Ragone de potencia específica (potencia obtenida por kilogramo de masa del dispositivo) con respecto a la energía específica (energía almacenada por kilogramo de masa del dispositivo) de los dispositivos de almacenamiento de energía más comunes.

En esta figura, se puede observar que la tecnología del supercapacitor puede tender un puente en la brecha existente entre baterías y capacitores, en términos tanto de potencia específica como de energía específica. Además, otras características de los supercapaci-

64. Adaptado de Lois, A y Trentadue C., (2016), *Aplicaciones de supercapacitores en el transporte*. Documentos II Congreso Argentino de Energías Sustentables, UTN FRBB – UNS – UNComahue.

tores son la operación libre de mantenimiento, un ciclo de vida más largo que las baterías, su insensibilidad a la variación de la temperatura ambiente, la rapidez de carga y descarga, su capacidad de proporcionar corrientes de carga altas (cosa que daña a las baterías) y, por último, que no presentan en su composición elementos tóxicos, muy común en las baterías. Todos estos son atributos clave que hacen a los supercapacitores más atractivos y versátiles como dispositivos de almacenamiento de energía de alta potencia.

La principal desventaja de los supercapacitores es la limitada capacidad de almacenar energía y, al día de hoy, su mayor precio. En realidad, debido a sus diferentes prestaciones, capacitores y baterías no son sistemas que rivalicen entre sí, sino más bien se pueden considerar en muchas aplicaciones como sistemas complementarios donde la batería aporta la energía mientras el supercapacitor aporta la potencia, por ejemplo, a los sistemas de distribución de potencia en circuitos electrónicos y el frenado regenerativo en sistemas de transporte.

Las tres categorías en que podemos agrupar a estos dispositivos son los EDCL – supercapacitores electrostáticos de doble capa, los pseudocapacitores y los AEDLC – supercapacitores asimétricos de doble capa híbridos.

Los EDLCs utilizan las interfaces entre el electrodo y el electrolito para el almacenamiento de energía. Para los electrodos en EDLC comerciales se utiliza carbón activado. Este puede exhibir valores de capacidad específica de 100-120 F/g en electrolito orgánico. Para incrementar aún más la capacitancia se han diseñado estructuras de carbono complejas, tales como el aerogel de carbono, los nanotubos de carbono (CNT), el grafeno y carbono obtenido como derivado de carburos metálicos, por ejemplo el TiC. Estos materiales son más caros que el carbón activado; sin embargo, sus capacidades capacitivas lo superan por mucho.

Con el fin de aumentar la capacidad de un supercapacitor, se pueden utilizar electrodos de un material compuesto por carbón activado y algún material redox activo electroquímico; los óxidos metálicos son buenos candidatos para este uso. Ellos almacenan energía “química-mente” a través de reacciones redox donde una especie transfiere electrones a la otra, como en una batería.

De esta manera, el almacenamiento de electrones en la interfaz electrodo/electrolito del EDLC no es simplemente un proceso físico, ocurrirá también algún tipo de reacción de oxidación/reducción rápida y reversible que dará de 10 a 100 veces más capacitancia que se obtiene con electrodos de carbono puro.

El último tipo de CE son los híbridos. Como su nombre lo indica, un supercapacitor asimétrico está configurado con electrodos diferentes: un electrodo farádico similar al de una batería y un electrodo de carbón micro-poroso. Las características de carga/descarga de los capacitores híbridos tienen la característica de un capacitor de doble capa (tensión lineal en función del tiempo para una corriente de carga/descarga constante) y la de una batería (límites de tensión fijados por el potencial del electrodo tipo batería). La densidad de energía de los capacitores híbridos que utilizan carbono intercalado (grafito) en uno de los electrodos es significativamente mayor que la de los capacitores de doble capa de carbono / carbono.

Los supercapacitores están demostrando ser dispositivos de gran utilidad en sistemas de transporte de personal y equipos, dado que posibilitan distintos grados de ahorro de energía en el funcionamiento de estos sistemas. Asimismo, a medida que crecen las aplicaciones de los supercapacitores, el segmento de mercado militar ha demostrado una creciente necesidad de módulos diseñados específicamente para abordar una variedad de desafíos de energía.

Algunos ejemplos, entre las aplicaciones en estudio o en implementación, para el campo de la defensa son: energía de reserva para sistemas electrónicos en vehículos, energía de reserva

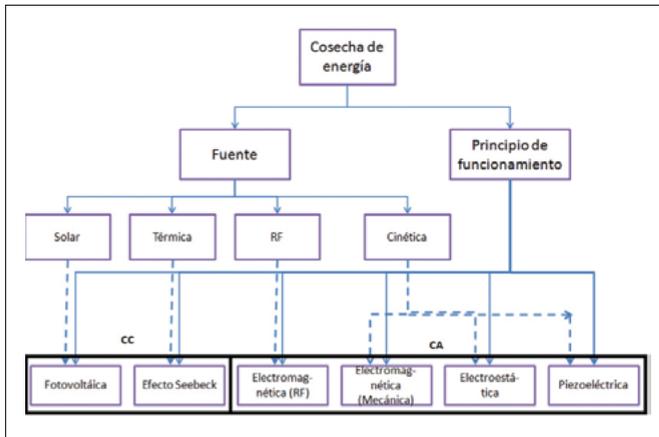
para sistemas de control de fuego en blindados, energía de reserva para mantener memoria en artefactos de comunicaciones, descargas de alta energía en vehículos navales, encendido en frío, suspensión activa, sistemas de *start-stop* de motores de vehículos terrestres, etc.

Cosecha de energía

Esta relativamente nueva expresión (*energy harvesting*) agrupa varias tecnologías que pueden ser de interés para la defensa.

Entendemos como cosecha de energía (*energy harvesting* o *energy scavenging*, en la literatura en inglés) como el proceso de extraer pequeñas cantidades de energía del ambiente a través de diversas fuentes de energía. La energía disponible para la cosecha es proporcionada principalmente por irradiación (iluminación artificial y natural), por radiofrecuencia ambiente, por fuentes térmicas y fuentes mecánicas (como por ejemplo la energía producida al caminar).

FIGURA 3 - TIPOS DE COSECHA DE ENERGÍA



En el contexto de este documento nos referiremos solo a dos de estas fuentes: los materiales piezoeléctricos y las fuentes biomecánicas, dado que son las que al presente se están investigando para aplicaciones operacionales.

Los materiales piezoeléctricos generan una pequeña tensión cuando son deformados mecánicamente. Tanto la vibración como la presión producidas por cualquier medio puede estimularlos para convertir algo de esa energía mecánica en energía eléctrica.

ca, siendo esta potencialmente útil para las tropas. Actualmente, estas tecnologías han sido probadas en el laboratorio⁶⁵.

Las celdas fotovoltaicas convierten radiación, principalmente del sol, en energía eléctrica usable con materiales semiconductores y fotovoltaicos. Muchas aplicaciones prácticas existen a nivel de las tropas y se emplean actualmente en operaciones.

Las células de silicio amorfo de capa fina son las que actualmente se utilizan en operaciones debido a su bajo costo relativo y robustez. Actualmente, las tropas que operan en Irak y Afganistán tienen provistos convertidores solares que generan hasta 60 vatios y pesan aproximadamente 5 kilos.

Puesto que el flujo solar es fijo, la única manera de aumentar la energía disponible para ser cosechada es la mejora en la eficiencia de conversión. Para ello, en vez de las células de silicio amorfo, se pueden emplear células de silicio cristalino. Esta tecnología es madura para aplicaciones donde las células puedan montarse rígidamente y donde el costo no sea un problema. Junto con el aumento de la eficiencia de conversión, estas celdas pueden ser dobladas

65. Howells, C., (2008), *Piezoelectric energy for soldier systems*. US Army CERDEC C2D.

o mutiladas y seguir funcionando. Su mayor limitación es que cuestan más que las células de película delgada amorfas.

Actualmente se está ensayando colocar una pantalla plana de 10 centímetros x 17 centímetros como tecnología vestible, integrada en las prendas exteriores del combatiente, siempre que reciba radiación solar. Combinada de manera híbrida con una batería de ion litio que podrá coleccionar energía puede colaborar a mantener su carga y alimentar así sus equipos electrónicos.

Hay un considerable margen para mejoras en la ingeniería de fotocélulas de alta eficiencia. Dispositivos realizados con células fotovoltaicas multifunción de GaInP/GaAs/Ge han demostrado hasta un 38 por ciento de eficiencia sin concentración, mientras que algunas tecnologías rondan el 45 por ciento, contra un 20 por ciento de las celdas de silicio amorfo⁶⁶. También, la aplicación de la nanotecnología en la forma de pozos cuánticos y puntos cuánticos prometen nuevos aumentos en la eficiencia, de tal manera que un panel que produzca 60 vatios tendría las dimensiones de un naípe de juego de cartas, lo que permite su rápida integración en las prendas exteriores de vestimenta.

Otra fuente de interés es la energía biomecánica. Esta energía es la que proviene fundamentalmente del movimiento de piernas y brazos, que de alguna forma es cosechada para convertir parte de la energía cinética en energía eléctrica utilizable. En general, la cosecha de energía biomecánica se ha concentrado en el movimiento de las piernas, ya que ellas se utilizan repetidamente y de manera más o menos regular para la locomoción, mientras que el movimiento del brazo es muy variable, y relativamente no se mueven cuando están transportando una carga.

FIGURA 4 - SISTEMA DE COSECHA DE ENERGÍA BIOMECÁNICA



La cosecha de energía biomecánica no es nueva; los memoriosos recordarán las radios de campaña con sus generadores a manivela o a pedal de mediados del siglo pasado como las linternas que se cargan agitándolas.

Se ha descrito la locomoción humana como un “péndulo imperfecto”⁶⁷. En un péndulo, se producen intercambios entre la energía potencial, almacenada en la elevación vertical del péndulo, y la cinética, como el péndulo pasa por el punto de menor energía potencial. Algunos trabajos están tratando de tomar ventaja de estos ciclos energéticos para

obtener electricidad. Algunos de los sistemas en estudio para aplicaciones militares, como el mostrado en la Figura 4 toman energía del movimiento de la articulación de la rodilla, convirtiendo el movimiento rotacional de la misma en suficiente electricidad para cargar cuatro teléfonos inteligentes en una hora⁶⁸. Actualmente está siendo evaluado operacionalmente por las Fuerzas Armadas de Estados Unidos.

Otro sistema en evaluación operacional es a partir de la energía generada por el movimiento de apoyo del talón del pie durante la marcha⁶⁹.

66. MITEI: *The future of solar energy*, (2015), Massachusetts Institute of Technology.

67. Kunzig, R., (2001), *The Physics of... Walking*, Kalmbach Publishing Co. <http://discovermagazine.com/2001/jul/featphysics>

68. <http://www.bionic-power.com/press/>

69. Purwadi, A. et al., (2015), *Development of Biomechanical Energy Harvesting Device using Heel strike*. IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915037898>

Finalmente, dentro de este campo, en agosto 2016, la universidad Virginia Tech ha recibido un contrato del ejército de Estados Unidos para desarrollar una mochila que coseche energía. Esta tecnología, que se espera pese aproximadamente medio kilogramo, tendrá una capacidad de cinco a veinte vatios, usando un rectificador de movimiento mecánico (MMR). Esta tecnología convierte el movimiento de vibración oscilatoria en una rotación unidireccional con la que se genera electricidad a medida que el portador camina.

Otras áreas de tecnología química

Además de los temas expresados precedentemente, dentro de las tareas de observación tecnológica que desarrolla el CEPTM "Grl MOSCONI" en el área de química, también veremos los nuevos desarrollos en tecnologías vestibles (*wearable technologies*) y, dentro de estas, aquellas relacionadas con la vestimenta del personal, particularmente el desarrollo de nuevos dispositivos embebidos en los uniformes y efectos del equipamiento individual y colectivo. También atenderemos los temas de tecnología de alimentos, fuente primaria de energía para el combatiente.

A este respecto, se agrega entre los anexos al presente documento un trabajo referido al tema de uniformes que tiene por finalidad reunir información acerca de las últimas tendencias en tecnología textil de interés para el diseño de indumentaria militar, desarrollo de nuevos materiales, fabricación y proyección para el mercado actual, su impacto en el medioambiente y su potencial para su fabricación con recursos regionales.

Armas de destrucción masiva, desarme y no proliferación

De acuerdo a la versión más comúnmente usada de este concepto y adoptada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), las Armas de Destrucción Masiva (ADM) son aquellas armas que incluyen a las Nucleares, a las Químicas y a las Biológicas. Las primeras de ellas pueden incluir a las radiológicas, es decir, aquellas que basan su accionar en la liberación de energía como radiación (esto incluye a las armas de radiación mejorada, también llamadas bombas de neutrones⁷⁰). Su principal característica es su acción indiscriminada, tanto sobre combatientes como no combatientes, y sus efectos poco controlables.

Armas nucleares

Las armas nucleares son dispositivos explosivos que están basados en reacciones nucleares. Las primeras armas nucleares fueron desarrolladas por Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. En 1939, las preocupaciones acerca de que los alemanes pudieran estar trabajando en este campo llevaron a este país a establecer un Comité Asesor para evaluar la posibilidad de obtener una reacción autosustentable de fisión de uranio. En 1942, animados por su rápido progreso en dicho campo, los estadounidenses lanzaron un programa de desarrollo de armas atómicas con el nombre en clave de "Proyecto Manhattan". Después de tres años de trabajo intensivo, el 16 de julio de 1945, Estados Unidos detonó la primera bomba atómica del mundo en el sitio de prueba Trinity. El artefacto, basado en plutonio, superó todas las expectativas, produciendo una explosión de más de 20 kilotones (mil toneladas) de TNT. El 6 de agosto de 1945, un bombardero B-29 soltó un artefacto nuclear de uranio enriquecido sobre

70. Las llamadas bombas "sucias" pueden referirse a dos tipos de armas: por un lado, a armas nucleares a las que se les coloca una capa de cobalto para lograr un mayor grado de contaminación del área afectada; por el otro, a bombas explosivas convencionales a las que se las "dopa" con materiales radiactivos para que sean dispersados por la fuerza de la explosión. Estas últimas no son consideradas ADM por la ONU.

la ciudad japonesa de Hiroshima. La explosión resultante destruyó instantáneamente más de dos terceras partes de la ciudad. Tres días más tarde, se soltó una segunda bomba sobre la ciudad de Nagasaki⁷¹, con efectos similares.

Rápidamente, el conocimiento se difundió. Solo cuatro años más tarde, la Unión Soviética llevó a cabo su primera explosión nuclear. El Reino Unido (1952), Francia (1960) y China (1964) se sumaron al grupo de estados poseedores de armas nucleares. Tratando de impedir el crecimiento de este grupo, los Estados Unidos y la entonces Unión Soviética impulsaron las negociaciones para que, junto a otros países, se estableciera el Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP) en 1968. Este es el primer tratado de su tipo y uno de los de mayor número de países que lo han ratificado en el mundo.

Pero no todos los países firmaron el tratado. En 1974 India llevó a cabo una explosión de un artefacto de plutonio de doce kilotones, demostrando que tenía la capacidad para desarrollar armas nucleares, aunque se abstuvo de hacer ensayos durante más de dos décadas. En mayo de 1998, India realizó una serie de ensayos de varios artefactos nucleares explosivos. Pakistán, que motivó por el resultado adverso de la guerra con India en 1971, que culminó con la separación de Bangladesh, había iniciado un programa en esta dirección, respondió a los pocos días llevando a cabo sus propios ensayos nucleares, agregándose así al selecto club de países poseedores de este tipo de armas.

Cuando se produjo el desmembramiento de la URSS, Rusia asumió el control de casi todos los armamentos nucleares existentes, mientras que Ucrania, Bielorrusia y Kazakistán optaron por destruir las armas que se encontraban en su territorio bajo supervisión internacional.

Otro país que produjo AN y que voluntariamente se desprendió de ellas ha sido Sudáfrica, que desarrolló este tipo de armamento y tuvo armas operacionales entre 1979 y 1991, año en el que destruyó las seis bombas que había construido en la década anterior.

Aunque no se ha confirmado ni negado oficialmente, se considera que Israel posee armas nucleares (política que es denominada de opacidad).

Después de la Guerra del Golfo de 1991, el trabajo efectuado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Comisión Especial de las Naciones Unidas sobre Irak (*UNSCOM*, por sus siglas en inglés) reveló que desde principios de los años ochenta, ese país había realizado esfuerzos sustantivos para adquirir la capacidad de desarrollar armas nucleares y había estado cerca de producir un diseño funcional.

El último país en producir armas de este tipo ha sido Corea del Norte, la cual luego de retirarse del Tratado de No Proliferación Nuclear en 2003, ha realizado cuatro ensayos con armas nucleares, en 2006, 2009, 2013 y la última en 2016. De acuerdo a lo comunicado oficialmente por este país, este último ensayo fue de un artefacto termonuclear.

Consideraremos como armas nucleares a los dispositivos explosivos nucleares y sus vectores. Cualquiera sea el tipo de arma nuclear, ya sea basadas únicamente en una fisión, o bien en una fisión y una fusión; ella requerirá de material fisible, o fisionable, que sea utilizable y de intrincada ingeniería.

El desarrollo de armas nucleares implica grandes retos de ingeniería. Por ejemplo, para obtener una reacción de fisión, el material fisible del explosivo primero debe volverse supercrítico. A partir de entonces, mantener la reacción de fisión se complica enormemente por el hecho de que la inmensa cantidad de energía liberada por la explosión inicial puede destruir el material fisible antes de que ocurra la reacción de fisión.

71. Nombre de código Fat-man, de implosión, basada en plutonio.

En el pasado, la única manera de asegurar la eficacia, confiabilidad y seguridad de las armas nucleares era a través de ensayos con artefactos similares a los operacionales. A pesar de que las armas nucleares pudieran desarrollarse sobre la base de la mera comprensión teórica, era indispensable probarlas para poder permitir la fabricación de sistemas sofisticados, así como para el desarrollo de nuevas armas y la adaptación de explosivos ya existentes a los nuevos vectores. Hasta la fecha, se sabe de siete países que han ensayado explosivos nucleares: China, Francia, la Unión Soviética, el Reino Unido y los Estados Unidos, así como la India y Pakistán, mientras se sospecha que Sudáfrica e Israel podrían haber realizado uno en conjunto en 1979⁷².

Actualmente, los avances en modelización de fenómenos del tipo de los involucrados en explosiones nucleares permiten utilizar sofisticados programas de informática para simular los efectos del funcionamiento de dichos artefactos. En particular, el uso de supercomputadoras, o también conjuntos o conglomerados de computadoras unidas entre sí (*Scalable supercomputer clustering* – en el caso de los Estados Unidos, el Lawrence Livermore National Laboratory ha unido para este fin más de 100.000 computadoras trabajando simultáneamente)⁷³, es cada vez mayor en los países poseedores de armas nucleares. Los modelos computarizados se basan en información precisa recopilada en extensos ensayos de campo.

Las armas nucleares pueden ser atractivas para los que buscan una capacidad asegurada de destrucción en masa. Como son considerablemente más destructivas y previsibles en sus efectos que las armas químicas o biológicas, las armas nucleares tienden a considerarse más fiables, y quizá más creíbles, que las primeras.

En cierta medida, a las armas nucleares quizá se les haya asignado un elemento de prestigio. Esto se debe tal vez a que su posesión requiere un nivel considerable de competencia tecnológica y a que históricamente su posesión había sido solo posible para las grandes potencias. Además del Tratado de NoProliferación Nuclear, hay un gran número de tratados multilaterales y bilaterales referidos al campo nuclear, alguno de los cuales listamos a continuación:

- > limitación o prohibición de explosiones nucleares (Tratado de prohibición parcial de ensayos de 1963, Tratado de limitación de ensayos nucleares subterráneos de 1974; Tratado de prohibición total de ensayos nucleares, entre otros)
- > limitación de armas nucleares (Tratado de antimisiles balísticos, Tratado de limitación de armas estratégicas I y II, Tratado de reducción de armas ofensivas, Tratado de misiles de alcance intermedio, etc.)
- > proliferación de armas nucleares (Tratado de no proliferación; Convención para la protección física de material nuclear; Norma para el transporte seguro de combustible nuclear irradiado, plutonio o desechos altamente radiactivos en recipientes; Tratado de prohibición de producción de material fisionable, Grupo de proveedores nucleares; Régimen de control de tecnología misilística; Resolución 1540 del Consejo de Seguridad de la ONU, entre otros)

El problema más importante de todos estos tratados es que son documentos que vinculan solamente a países, dejando a los actores no estatales fuera de dichos mecanismos de limitación.

72. Incidente Vela:

<http://www.isis-online.org/publications/southafrica/03012001%20press%20release%20on%20flash.html>
<http://www.gwu.edu/~nsarchiv/NSAEBB/NSAEBB190/03.pdf>

73. Hoffman, D. (2011), *Supercomputers offer tools for nuclear testing — and solving nuclear mysteries [Las supercomputadoras ofrecen herramientas para realizar pruebas nucleares y resolver misterios nucleares]* The Washington Post. https://www.washingtonpost.com/national/national-security/supercomputers-offer-tools-for-nuclear-testing--and-solving-nuclear-mysteries/2011/10/03/gIQAJnngdM_story.html

Armas biológicas

Las armas biológicas hacen uso deliberado de los materiales patógenos para causar la muerte o daños a seres humanos o animales.

Desde hace mucho tiempo el hombre ha conocido el uso de la enfermedad como instrumento de guerra. Los orígenes modernos de las armas biológicas, sin embargo, se remontan a la época de la Primera Guerra Mundial y al presunto intento del ejército alemán de utilizar agentes patógenos con fines de sabotaje. Después de la guerra, en una gran cantidad de países se iniciaron proyectos de investigación y desarrollo de armas biológicas.

En 1921 fue creada en Francia la Comisión de Bacteriología para diseñar una política de guerra biológica. A mediados de los años treinta, los franceses comenzaron a desarrollar agentes antipersonales y antianimales en el laboratorio de Le Bouchet.

En el Reino Unido, el Comité de Defensa Imperial estableció un Subcomité de Armamentos Biológicos en 1936 para preparar medidas contra un eventual ataque biológico. El establecimiento de una Unidad Especial de Armas Biológicas en Porton Down en 1940 marcó el inicio del programa británico de armas biológicas. La investigación en Porton Down se centró en armas anticultivos y antianimales utilizando la toxina botulínica y ántrax. Para 1941 se habían producido cerca de cinc millones de raciones de alimento para ganado que contenían ántrax y en 1942 se ensayaron varias bombas de ántrax en la isla de Gruinard en Escocia. En mayo de 1942, los británicos unieron esfuerzos con Canadá y algunos meses después con Estados Unidos. Esta colaboración se mantuvo durante y después de la guerra.

Estados Unidos comenzó a interesarse por las armas biológicas en 1941, cuando se implantó una Comisión Especial para evaluar la amenaza de guerra biológica. Al final de la guerra, los estadounidenses habían examinado un amplio número de agentes, innovado técnicas de estabilización por congelamiento o deshidratación a gran escala y probado al menos una bomba de fragmentación diseñada para la dispersión de agentes biológicos.

En la Unión Soviética, un programa de armas biológicas comenzó alrededor de 1927. Antes de la Segunda Guerra Mundial había sido ya investigada una variedad de patógenos y, según se dice, para los inicios del conflicto los soviéticos eran capaces de manufacturar agentes para provocar tularemia, tifoidea y fiebre Q.

En Japón, se estableció un programa ofensivo de armas biológicas a mediados de los años treinta. Las principales instalaciones japonesas estaban ubicadas en Beiyinhe y Pingfan en Manchuria. En el curso de la Segunda Guerra Mundial, los japoneses ensayaron agentes biológicos en prisioneros de guerra y trabajaron en varios diseños de bombas para la diseminación en gran escala de bacterias, así como en un artefacto con tanque de diseminación por vía aérea (Spray-tanks). Además, se cree que los japoneses utilizaron agentes biológicos contra los soviéticos en Mongolia en 1939, contra tropas chinas en 1942 y contra civiles chinos de 1940 a 1944.

En Alemania, se lanzó un modesto programa de armas biológicas en 1943 con el establecimiento de una estación de investigación en Posen. La instalación funcionó hasta 1945, cuando fue capturada por los soviéticos. Las investigaciones realizadas incluyeron el estudio de agentes antipersonales y anticultivos y de tanques de diseminación.

Hacia fines de la Segunda Guerra Mundial, si bien ningún país había logrado un avance significativo, la viabilidad de las armas biológicas quedó, al menos, firmemente establecida. Después de la guerra, la investigación y desarrollo de armas biológicas continuaron de manera notoria en Estados Unidos y la Unión Soviética. En 1950, Estados Unidos decidió establecer, en tiempos de paz, una instalación de producción de agentes biológicos cerca de Pine Bluff, Arkansas. Un año más tarde ya se producían ahí agentes anticultivos. También, a inicios de

los años cincuenta se llevó a cabo una serie de experimentos de campo a gran escala, en los que se diseminaban bacterias inocuas sobre áreas urbanas y rurales seleccionadas para probar la efectividad de los métodos de dispersión aérea de agentes biológicos. El programa estadounidense de armas biológicas terminó el 25 de noviembre de 1969, cuando el presidente Richard Nixon anunció que en lo sucesivo Estados Unidos renunciaba a todas las formas de guerra biológica y ordenó el cierre integral de las instalaciones involucradas en la producción de agentes biológicos, así como la completa destrucción de las existencias de armas biológicas. Una declaración emitida por Nixon el 14 de febrero de 1970 amplió esa renuncia a las armas tóxicas. Desde entonces, la investigación biológica con fines bélicos en Estados Unidos se centró exclusivamente en el desarrollo de medidas defensivas.

Informes públicos del programa soviético de armas biológicas indican que, durante la Guerra Fría, la Unión Soviética realizó un amplio esfuerzo de investigación y producción. Al final de la Segunda Guerra Mundial, los soviéticos se quedaron con gran parte de las técnicas de fabricación avanzada de agentes de Alemania y con las investigaciones sobre desarrollo de armas del Japón. Posteriormente, los soviéticos empezaron a investigar nuevos tipos de agentes y técnicas mejoradas para su producción y dispersión. También parece que se fabricaron cantidades considerables de armas biológicas. Durante el decenio de 1970, el programa soviético de armas biológicas trató, según se dice, de beneficiarse de los avances en el campo de la ingeniería genética para crear agentes patógenos más virulentos. El 2 de abril de 1979 se produjo un brote de ántrax pulmonar en torno a una instalación militar en Sverdlovsk. En una declaración hecha pública el 29 de enero de 1992, el Presidente ruso Boris Yeltsin reconoció que el brote fue causado por la liberación accidental de esporas de ántrax. Al mismo tiempo, ordenó el cese de todas las actividades rusas relativas a las armas biológicas y la destrucción de cada arsenal de armas biológicas existente.

Se considera que, desde la Segunda Guerra Mundial, otros países intentaron desarrollar armas biológicas además de la Unión Soviética y Estados Unidos. El ejemplo más notable en este sentido es Irak. Se confirmó que entre 1985 y 1991 Irak llevó a cabo un intenso programa de desarrollo de armas biológicas. El programa cubría una extensa gama de agentes antipersonales y antiplantas, y un amplio rango de vehículos vectores, incluyendo misiles balísticos. En tiempos de la Guerra del Golfo, en 1991, Irak había producido cantidades significativas de agentes biológicos, una parte importante de los cuales había sido cargada en municiones y se encontraba desplegada. Al término del conflicto, la comunidad internacional ordenó la destrucción de todas las armas de destrucción en masa iraquíes, incluyendo las armas biológicas.

Las armas biológicas consisten en agentes biológicos y las municiones, equipo o medios empleados para su distribución. Los agentes de armas biológicas actúan mediante sus efectos patógenos sobre los organismos vivos. Los agentes biológicos del futuro podrían también dañar equipos y provocar corrosión o degradación de sus componentes plásticos o de caucho. La mayoría de los agentes de armas biológicas son organismos vivos que pueden reproducirse y multiplicarse una vez dispersos. Esta característica les permite incrementar sus efectos a través del tiempo. Adicionalmente, algunos agentes pueden ocasionar contagio, es decir que pueden diseminar enfermedades de un organismo contaminado a otro.

Los agentes biológicos susceptibles de ser utilizados en armas se clasifican normalmente en cinco categorías: bacterias, virus, rickettsias, hongos y toxinas. Otros agentes como los priones podrían ser incluidos en esta lista.

Los agentes biológicos pueden dispersarse mediante una variedad de explosivos, vaporizadores o municiones vectores. Las municiones atomizadoras diseminan el agente biológico

como una nube de aerosol invisible formada por partículas microscópicas. Las municiones atomizadoras típicas requieren cierto tipo de artefacto inyector o tanque de diseminación. Ofrecen un excelente control respecto del tamaño de las partículas y evitan la tensión y las desventajas concomitantes de los artefactos explosivos. Las municiones vectores emplean generadores especiales de aerosol fijados a los aviones o a los vehículos de tierra para transportar polvos en dosis establecidas previamente. Procesar los agentes de esta manera es normalmente difícil, pero una vez que se ha logrado dispersar los agentes es relativamente simple y efectivo.

El empleo de armas biológicas ofrece tanto ventajas como desventajas.

Por un lado, las armas biológicas son más económicas de producir y de emplear que las armas nucleares, o incluso que algunas armas químicas o convencionales; pueden ofrecer una considerable flexibilidad táctica, ya que se dispone de una amplia gama de agentes que puede ser combinada en numerosas formas; pueden atacar amplios objetivos durante períodos prolongados de tiempo, dada su capacidad de multiplicarse y aun de provocar epidemias, así como la de contaminar áreas por largo tiempo; pueden consumir recursos significativos del enemigo causando altos índices de mortalidad y exigiendo la movilización de recursos masivos en respuesta; pueden tener un impacto psicológico devastador sobre sus objetivos y provocar el miedo de contaminación no perceptible y muerte inminente; y son idóneas para operaciones encubiertas o terroristas porque pueden ser dispersadas discretamente y sus efectos tardan en desarrollarse.

Por otro lado, las armas biológicas son altamente inseguras debido a que sus efectos son extremadamente inciertos y nunca inmediatos en razón de su inevitable período de incubación, que puede tomar desde horas hasta días después de la contaminación; su empleo conlleva el riesgo de contaminar incluso a los atacantes y pueden complicar considerablemente otras operaciones militares, lo que impone regímenes onerosos de medidas precautorias. Su empleo está prohibido por una convención internacional y penado con sanciones internacionales.

Las armas biológicas resultan quizás atractivas para algunos estados o actores subestatales que busquen adquirir capacidad de armas de destrucción masiva. Comparadas con las armas nucleares, las armas biológicas son considerablemente más fáciles y más baratas de construir. Como se ha explicado, cualquier país o grupo subnacional decidido a producir algún tipo de agente biológico es capaz de hacerlo, probablemente con una inversión mínima, mas la diseminación de este puede ser complicada.

Por ejemplo, antes de la Guerra del Golfo de 1991, Irak había logrado avances significativos en el desarrollo de una capacidad completa para producir armas biológicas en un período muy corto de tiempo, mientras que la secta japonesa Aum Shinrikyo, conocida por su ataque químico contra el subterráneo de Tokio en junio de 1995, se las había arreglado para producir ántrax, pero había fracasado en desarrollar un método viable de diseminación⁷⁴. El primer laboratorio de cultivo para producción de toxinas de la secta se estableció en 1990 y luego fue reemplazado por dos laboratorios nuevos. En ellos la secta cultivó y experimentó con toxina botulínica, ántrax, cólera y fiebre Q. En 1993, el líder de la secta, Shoko Ashahara, y un grupo de 16 doctores y enfermeras viajaron a Zaire con el propósito de obtener muestras de Ébola.

A pesar de su atractivo, las armas biológicas son percibidas generalmente como no experimentadas, inestables y, por lo tanto, militarmente inferiores a las armas nucleares o químicas.

74. Drotman, P. (Ed.), (2016), *Emerging Infectious Diseases* [Enfermedades infecciosas emergentes]. <http://www.cdc.gov/ncidod/eid/vol5no4/olson.htm>

Más aún, su empleo está prohibido por una convención internacional desde 1925 y su desarrollo o posesión desde 1972, por la Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, la Producción y el Almacenamiento de Armas Bacteriológicas (Biológicas) y Toxínicas y sobre su Destrucción, conocida como la Convención de Armas Biológicas (*BWC*, por sus iniciales en inglés).

Armas químicas

Las armas químicas utilizan deliberadamente las propiedades tóxicas de sustancias químicas para causar la muerte o daños.

El moderno uso de sustancias químicas como instrumento de guerra se produjo el 22 de abril de 1915 en Ieper (Ypres, en francés e inglés) en el contexto de la Primera Guerra Mundial, contra soldados canadienses, británicos, y franceses, incluyendo estos últimos tropas francesas metropolitanas así como senegaleses y tiradores argelinos (infantería ligera), sobre quienes el ejército alemán liberó 168 toneladas de cloro. El uso alemán de cloro en Ieper señaló el principio de la guerra de gases en el frente occidental⁷⁵. Al poco tiempo, todos los contendientes utilizaban regularmente gases como parte de sus principales operaciones militares y trataron de superarse unos a otros en las innovaciones ofensivas y defensivas. A medida que la guerra avanzaba, sustancias nuevas y de mayor toxicidad, como el fosgeno y el mostaza, llegaron al campo de batalla, inicialmente introducidas por los alemanes y luego adoptadas por los aliados.

Después de la guerra, el desarrollo de armas químicas siguió mereciendo bastante atención. Todas las principales potencias llevaron a cabo programas de investigación encaminados a construir medidas de protección y a sintetizar nuevos agentes más potentes. Particularmente, en 1936, un químico alemán que estaba trabajando en la creación de nuevos pesticidas encontró una sustancia sumamente tóxica que atacaba al sistema nervioso, a la que denominó tabún (GA). Dos años después, descubrió otra sustancia aún más tóxica, a la que llamó sarín (GB). Así, había nacido un nuevo tipo de armas químicas.

En el período de entre guerras se utilizaron en varias ocasiones las armas químicas. El ejército italiano utilizó el gas en Abisinia, los españoles en Marruecos y los japoneses lo emplearon en su invasión a China. Aunque cabe suponer que se pensó en su empleo en varias ocasiones, con la excepción de los japoneses en China, las armas químicas no desempeñaron ningún papel en la Segunda Guerra Mundial.

Al terminar esta, la investigación sobre armas químicas se centró en las nuevas sustancias tóxicas capturadas a los alemanes: el tabún y el sarín.

Tanto los Estados Unidos como la Unión Soviética crearon grandes instalaciones de producción y se dedicaron a perfeccionar un gran número de sistemas de lanzamiento. A finales del decenio de 1950, los investigadores británicos desarrollaron un nuevo tipo de compuestos neurotóxicos llamados agentes V. Estos agentes eran más estables y considerablemente más tóxicos que el sarín. Los estadounidenses llamaron VX a su versión de los mismos compuestos, y los soviéticos, Vx.

Las armas químicas consisten en productos químicos tóxicos (y sus precursores) y en los dispositivos para lanzarlos al blanco. Los productos químicos tóxicos inducen la muerte, lesiones o incapacidad temporal. Los precursores forman parte de la producción de productos químicos tóxicos.

⁷⁵. En el frente ruso ya había sido usado en menor escala en la Batalla de Bolimov, el 31 de enero de 1915, también por parte de los alemanes, quienes en esa ocasión utilizaron proyectiles de artillería con un lacrimógeno de baja eficiencia (bromuro de xililo).

Las sustancias químicas tóxicas usadas en la producción de armas químicas pueden clasificarse de acuerdo con varios criterios como, por ejemplo, su volatilidad o su uso militar. Sin embargo, comúnmente se agrupan, de acuerdo con sus efectos, de la siguiente manera: agentes sanguíneos, agentes vesicantes, agentes asfixiantes, agentes neurotóxicos, agentes incapacitantes, agentes lacrimógenos y toxinas.

La diseminación apropiada es crucial para las armas químicas. A menos que las sustancias tóxicas sean distribuidas eficientemente sobre el blanco, su impacto directo será probablemente insignificante.

Finalmente, el nivel de protección de que disponga el blanco también será determinante para los efectos de las armas químicas. Si no existe protección, las armas químicas pueden tener efectos devastadores, lo que afecta particularmente a la población civil, que rara vez podrá ser protegida de manera efectiva contra estas armas. La detección temprana y el equipo de protección personal y colectivo adecuados consiguen invalidarlas en gran medida.

Las armas químicas presentan la mayor amenaza de empleo por agentes no estatales. La liberación de sustancias tóxicas contra civiles desprotegidos puede causar efectos de gran magnitud, tanto por las bajas directas del ataque como por el pánico y la saturación de los servicios médicos. Un ejemplo de esto lo dio el ataque de sarín perpetrado por la secta Aum Shinrikyo en el metro de Tokio en junio de 1995. También pueden imaginarse ataques estratégicos contra áreas civiles, pero en un grado bastante menor. A menos que se logre que sean totalmente sorpresivos, esos ataques difícilmente son efectivos más allá de una desorganización menor de las actividades cotidianas normales. Comparadas con las armas nucleares, son bastante más fáciles de desarrollar, producir y mantener.

Las armas químicas han sido producidas por varios Estados y muchos otros tienen la capacidad para producirlas. Desde 1993, sin embargo, las armas químicas han sido prohibidas por el derecho internacional y todos los países de la región han ratificado ese tratado, cuyo nombre completo es la Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, Producción, Almacenaje y Uso de Armas Químicas y sobre su Destrucción.

Conclusión

Las tecnologías de armas de destrucción masiva y los materiales relacionados para su fabricación se encuentran cada vez más disponibles para estados o actores no-estatales con importantes recursos financieros. La información técnica relativa a este tipo de armas está disponible en Internet y las materias primas para la producción de productos químicos, biológicos y armas radiológicas están ampliamente disponibles para fines comerciales legítimos.

Al mismo tiempo, organizaciones extremistas de ideologías nihilistas o de alto grado de radicalización, que justifican el empleo de cualquier medio para la eliminación de quienes consideran sus enemigos, sin considerar los daños colaterales, particularmente aquellas que basan su accionar en la iluminación religiosa, podrían sentirse tentadas a utilizar este tipo de armas. De hecho, el antecedente de Aum Shinrikyo debería servir de alerta sobre este tema.

Las tareas del Centro de Estudios sobre Prospectiva Tecnológica Militar "Grl MOSCONI" referidas a este capítulo estarán orientadas a la búsqueda de los nuevos desarrollos de tecnologías para el control de amenazas, su reducción, el apoyo a las tropas y a la población de las áreas afectadas o amenazadas, es decir, medios de detección, sistemas de protección individual y colectiva, sistemas de descontaminación, profilaxis y recuperación relacionados con ADM.

(*) **Carlos Hugo Trentádue:** es ingeniero militar de la especialidad química y oficial retirado del Ejército Argentino, donde alcanzó el grado de coronel de Artillería. Fue director de dos plantas de materiales energéticos y miembro de la Organización para la prohibición de Armas Químicas.

Es docente e investigador universitario. Autor de numerosos artículos y presentaciones. Es miembro activo de la Sociedad de la Industria Química del Reino Unido, de la Sociedad para la Historia de la Tecnología de los Estados Unidos. También es integrante del Área de Prospectiva en Energía Eléctrica de la UTN-FRGP, y del Grupo de Interés en Energías del Mar Argentino.