

1.4

Armas de destrucción masiva

Las armas nucleares

Por el Coronel A (R) Dr. OIM Osvaldo Enrique Azpitarte*

Temario

1. Historia	113
2. Tipos de armas nucleares	118
3. Efectos de las armas nucleares	123
4. Materiales físimos - Producción	127
5. Países poseedores de armas nucleares	131
6. Doctrina de empleo	133
7. Marco legal	140
8. La energía nuclear en América Latina	143
9. Conclusiones	150

Historia de las armas nucleares¹

El advenimiento de la era nuclear y la posterior aparición de las armas nucleares fue posible a partir de una serie de descubrimientos que se sucedieron a partir de principios del siglo XX.

En 1911, Ernest Rutherford (Nueva Zelanda), a partir de la irradiación de una fina lámina de oro, propuso que el átomo estaba constituido por una zona central con carga eléctrica positiva donde se concentraba toda la masa y que los electrones, con carga negativa, giraban en órbitas alrededor de ese núcleo.

En 1913 el físico danés Niels Böhr perfeccionó el modelo de Rutherford con una hipótesis según la cual los electrones estaban distribuidos en capas definidas (o niveles cuánticos) a cierta distancia del núcleo. De este modo se definió la configuración electrónica de los distintos elementos químicos.

La tercera partícula fundamental, el neutrón, fue descubierto en 1932 por James Chadwick (Reino Unido). El neutrón es una partícula eléctricamente neutra con una masa ligeramente superior a

¹ Rhode Richard, The Making of the Atomic Bomb, Simon and Schuster, New York, 1986

la de los protones. Este descubrimiento fue fundamental para la posterior postulación de la fisión nuclear, proceso en el que se bombardean átomos de uranio con neutrones, lo que provoca la ruptura de su núcleo y la liberación de energía. Si se bombardearan átomos con partículas cargadas (protones), parte de su energía se perdería en vencer la repulsión electrostática.

A finales de 1938 un equipo de investigadores alemanes del Kaiser Wilhem Institut de Berlín, integrado por Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lisa Meitner y Otto Frisch, descubrió la reacción de fisión nuclear, a partir de la identificación del elemento Bario como consecuencia de la fragmentación de los núcleos de uranio.

La reacción de fisión consiste en hacer incidir un neutrón sobre el núcleo de un átomo físil (U^{235} o Pu^{239}), que escinde al núcleo en dos fragmentos de fisión y libera energía en forma de energía cinética.

Posteriormente, el físico húngaro Leó Szilárd postuló el concepto de masa crítica y el de reacción de fisión en cadena, fenómeno que podría provocar una liberación de energía descomunal, como nunca se había visto.

En forma simultánea con el descubrimiento del proceso de fisión nuclear, y sobre la base de los experimentos de Ernest Rutherford, Mark Oliphant (Australia), en 1932, observó por primera vez la fusión de núcleos ligeros (isótopos de hidrógeno). Posteriormente, durante el resto de ese decenio, Hans Bethe (Alemania, Estados Unidos) estudió las etapas del ciclo principal de la fusión nuclear en las estrellas. La investigación de la fusión para fines militares se inició en la década de 1940 pero no tuvo éxito sino hasta 1952. La investigación relativa a la fusión controlada con fines civiles se inició en la década de 1950, y continúa hasta el presente.

Visto con perspectiva actual, el descubrimiento de la energía nuclear y su control podría haber supuesto inicialmente su aplicación a fines pacíficos, como la producción de energía eléctrica o de calor para procesos fabriles. Sin embargo, el desencadenamiento de la Segunda Guerra Mundial, en septiembre de 1939, hizo que, rápidamente, su aplicación se volcara a fines militares y las principales potencias involucradas se embarcaran en proyectos, entonces pruebas piloto, para producir armas nucleares.

Las primeras armas nucleares fueron desarrolladas por los Estados Unidos, a través del Proyecto Manhattan, del que trataremos luego. No obstante, el primer proyecto fue llevado adelante por los británicos.

“Tube Alloys” fue el nombre en clave del programa de investigación y desarrollo llevado adelante por el Reino Unido, con la participación de Canadá, para desarrollar armas nucleares.

En la Universidad de Birmingham, Rudolf Peierls y Otto Frisch, el primero alemán y el segundo austriaco, escribieron un memorándum explicando que una pequeña masa de uranio puro 235 podría ser utilizada para producir una reacción en cadena en una bomba con el poder de miles de toneladas de TNT. Esto condujo a la formación en 1940 del Comité MAUD, que dirigió el esfuerzo del Reino Unido para desarrollar armas nucleares. Constituido como Directorado, formó parte del Department of Scientific and Industrial Research. Debido a los altos costos involucrados y al hecho de que Gran Bretaña estaba librando una guerra dentro del rango de bombardeo de sus enemigos, el proyecto Tube Alloys fue finalmente absorbido por el Proyecto Manhattan y la mayoría de sus científicos e instalaciones fueron trasladados a los Estados Unidos.

En forma simultánea, en los Estados Unidos, Albert Einstein y Leó Szilárd escribieron una carta al presidente Franklin Roosevelt en la que le recomendaron comenzar el desarrollo de la bomba atómica. Einstein explicaba que muy pronto sería posible desencadenar una reacción nuclear en cadena que permitiría liberar enormes cantidades de energía. Mencionaba también la escasez de reservas de uranio de los Estados Unidos y que las minas de ese mineral se encontraban en la anti-

gua Checoslovaquia y en el Congo Belga. Le informó, además, que Alemania se había hecho cargo de las minas checas y había suspendido las ventas de uranio. Este hecho podría significar que los científicos alemanes del Instituto Kaiser Wilhelm podrían estar llevando a cabo, también, experimentos de fisión nuclear. En base a esto, le propuso a Roosevelt la colaboración entre científicos y la industria para desarrollar, lo más pronto posible, la mencionada bomba atómica.

Roosevelt ordenó a Lyman Briggs, de la National Bureau of Standards, que encabezase el “Comité Asesor de Uranio” para investigar las cuestiones planteadas por la carta de Einstein y Szilárd. El comité informó a Roosevelt, en noviembre de 1939, que el uranio “proporcionaría una posible fuente de bombas con una destructividad mucho mayor que cualquier cosa hasta ahora conocida”.

Como resultado de las recomendaciones de ese comité, en 1942, los Estados Unidos lanzaron el programa de desarrollo de armas nucleares finalmente conocido como Proyecto Manhattan. Este fue, probablemente, el mayor emprendimiento de investigación y desarrollo, no en términos de costos, pero sí en términos de personal e instalaciones involucrados, durante la Segunda Guerra Mundial. Fue dirigido por los Estados Unidos con el apoyo del Reino Unido y Canadá.

El proyecto se puso bajo la dirección del General de División Leslie Groves del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

El proyecto contemplaba la fabricación de los artefactos nucleares a partir del uso de dos materiales físisles: el Urano 235 (U^{235}) y el Plutonio 239 (Pu^{239}). Se denomina material físil a aquel que fisiona cuando es bombardeado con neutrones de cualquier energía. El Urano natural, el que se obtiene en las minas de uranio, está compuesto por un 0,7 por ciento de U^{235} y un 99,3 por ciento de U^{238} . El U^{238} solo fisiona con neutrones de muy alta energía, por lo tanto, no es físil y no sirve para fabricar un artefacto nuclear. El Pu^{239} es físil, aunque no es de origen natural. Se obtiene bombardeando el U^{238} con neutrones de baja energía. El U^{238} absorbe un neutrón y se convierte en Pu^{239} .

El desarrollo de los procesos de obtención del material físil puro fue muy costoso en términos materiales. Para ello fueron construidos dos centros de investigación y desarrollo:

- > Oak Ridge (Tennessee), en donde se desarrolló y llevó a cabo el proceso de obtención de U^{235} puro. Utilizando un proceso físico denominado “difusión gaseosa”, se pudo separar el U^{235} del uranio natural
- > Hanford (Washington), en donde se instalaron reactores nucleares moderados con grafito, para bombardear uranio natural y producir Pu^{239} . El Plutonio puro se obtenía del combustible quemado extraído de los reactores, por un proceso químico denominado fosfato de bismuto.

En Los Álamos (Nuevo México) se construyó el laboratorio donde se desarrollaron las bombas atómicas, a partir del material físil obtenido en Oak Ridge y Hanford. Robert Oppenheimer (Estados Unidos) fue nombrado director del laboratorio, que reunía a cerca de mil científicos.

En la madrugada del 16 de julio de 1945, se llevó a cabo la primera explosión de una bomba atómica de plutonio, en el desierto de Álamo Gordo (Nuevo México), en el sitio de ensayo conocido como Trinity.

Las bombas atómicas de uranio y de plutonio estuvieron listas al mismo tiempo. La primera fue denominada Little Boy, y tenía una potencia de 14.5 kT (1 kT o kiloton equivale a 1000 toneladas de TNT). Constaba de dos masas de uranio-235 subcríticas, que se proyectaban una sobre otra con explosivos convencionales, para formar un conjunto crítico en el momento de la explosión. Fue lanzada el 6 de agosto de 1945 sobre la ciudad japonesa de Hiroshima. La segunda, denominada Fat Man, de 20 kT de potencia, consistía en una esfera hueca subcrítica de plutonio que colapsaba sobre su centro por la acción de explosivos convencionales en el momento de la explosión. Fue lanzada el 9 de agosto sobre la ciudad japonesa de Nagasaki.

El efecto devastador de las dos bombas destruyó prácticamente las dos ciudades y provocó más de 200.000 muertes en total.

El 15 de agosto, seis días después de la detonación de Nagasaki, el imperio japonés anunció su rendición incondicional a los Aliados, con lo que concluyó la Guerra del Pacífico y, por lo tanto, la Segunda Guerra Mundial.

Con respecto a Alemania, es interesante hacer notar que, pese al convencimiento por parte de los aliados respecto de que estaba persiguiendo la construcción de artefactos nucleares, en realidad ésta había abandonado el tema. Si bien a partir de 1939 en Alemania se empezó a investigar sobre la idea de aplicaciones militares de la energía nuclear, principalmente en el ámbito académico, con la conformación del Grupo de Trabajo para Física Nuclear (Arbeitsgemeinschaft für Kernphysik), conocido como el “Club del uranio”, la incorporación a las fuerzas armadas de varios de sus miembros cortó los avances posibles de éste. En 1942, Walter Heisenberg, director-gerente del Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik, le expresó a los miembros del alto mando alemán que, durante la guerra, el país no estaba en condiciones de producir un arma nuclear. De acuerdo con las declaraciones posteriores de Albert Speer, Ministro de Armamentos y Producción de Guerra de Alemania, la impresión que tuvo de ese informe fue que el desarrollo y construcción de una bomba tomaría demasiado tiempo para tener algún tipo de influencia en el desarrollo de la guerra. La consecuencia directa de esa estimación fue que todo el programa quedó reducido a escala laboratorio y con el objetivo de producir un reactor nuclear.

La Unión Soviética, a partir de 1942, comenzó a prestar atención a este tipo de armas, principalmente basada en los informes que recibía de sus espías británicos. A principios de 1942, se puso a Ígor Vasílievich Kurchátov a cargo del programa nuclear soviético. Finalmente, el 29 de agosto de 1949, en el sitio de pruebas nucleares de Semipalatinsk (en ese momento - Campo de entrenamiento N° 2 del Ministerio de las Fuerzas Armadas), se probó la primera arma nuclear rusa, designada en la literatura como Izdeliye 501 (Artefacto 501) o Pérvaya mólniya (Primer Relámpago) o por el acrónimo RDS-1. Los soviéticos habían tenido gran éxito en penetrar los proyectos tanto británicos como norteamericanos, y recibieron casi toda la información relevante para el desarrollo de estas armas casi al mismo tiempo en que era obtenida en sus países de origen. El arma soviética fue una copia de la bomba estadounidense de plutonio detonada en el sitio Trinity y tuvo una potencia de 22 kilotonnes.

A partir de entonces se inició una carrera de armamentos nucleares entre la Unión Soviética y los Estados Unidos. Alarmados por la rapidez con la cual los soviéticos habían construido su bomba atómica y por el descubrimiento del espionaje soviético a su programa de armas nucleares, en 1950 los estadounidenses decidieron empezar a desarrollar armas a base de hidrógeno. Se esperaba que las armas de hidrógeno, llamadas comúnmente termonucleares, basadas en una combinación de fisión y fusión nuclear, incrementaran dramáticamente el poder destructivo de las bombas nucleares mediante el aumento de su potencia de kilotonnes a megatonnes. La idea de su desarrollo fue propuesta por el italiano Enrico Fermi a su colega húngaro Edward Teller en 1941 trabajando ambos dentro del Proyecto Manhattan. Este último luego se convirtió en el principal impulsor de este tipo de armas, lo que le valió el título de “padre” de las armas termonucleares, también llamadas bombas de hidrógeno, bombas H o bombas de fusión.

En 1952 Estados Unidos detonó la primera bomba de hidrógeno en el mundo. La fuerza de la explosión sobrepasó los diez megatonnes (millones de toneladas de TNT).

El primer diseño de fusión soviético fue desarrollado por Andrei Sajarov y Vitaly Ginzburg en 1949 (antes de que los soviéticos tuvieran una bomba de fisión de trabajo). En 1953, la Unión Soviética ensayó un artefacto estimulado por fusión, llamado RDS-6s, el cual tuvo una potencia de aproxi-

madamente 400 kilotonnes. Dos años después probó un artefacto termonuclear llamado RDS-37, con un diseño similar a los de Estados Unidos, con una capacidad aproximada de 1.5 MT. Finalmente, en octubre de 1961, los soviéticos ensayaron el concepto de explosiones por etapas cuando hicieron detonar la bomba llamada Tsar, con una potencia de 50 megatonnes, lo que fue hasta la fecha la mayor explosión nuclear en el mundo.

Al momento del colapso de la URSS, en 1991, los soviéticos poseían armas desplegadas en cuatro de sus repúblicas, Rusia, Ucrania, Bielorrusia y Kazakstán. Mientras Rusia decidió conservar su arsenal y trasladar las armas que se encontraban en Ucrania, las dos últimas naciones acordaron destruir las que se encontraban en su territorio.

El Reino Unido probó en 1952 un artefacto de fisión nuclear basado en plutonio de manera efectiva y en 1957, accionó un artefacto que incorporaba la fusión nuclear.

En Francia, la investigación y el desarrollo nucleares de la postguerra comenzaron en 1945 a cargo del Comisariado de la Energía Atómica (CEA). En 1954 se inició un programa de desarrollo de armas nucleares y en 1960 se llevó a cabo un primer ensayo de un explosivo de fisión nuclear con plutonio en territorio de Argelia, en ese entonces un departamento de la República Francesa. En 1968 Francia llevó adelante el proyecto Canopus, que consistió en la detonación de un artefacto termonuclear en el atolón de Fangataufa, próximo al atolón de Muroroa, en el Pacífico Sur, en los cuales se desarrollaron hasta 1996, alrededor de 200 ensayos nucleares.

Los esfuerzos de China para desarrollar armas nucleares empezaron en 1953, con la ayuda de la Unión Soviética. En 1955 China estableció el Ministerio de Industria Nuclear. Con el apoyo soviético, iniciaron investigaciones en Beijing en el Instituto de Física y Energía Atómica y se comenzó la construcción de una planta de enriquecimiento de uranio en Lanzhou, con el objetivo de obtener el material para armas nucleares. El 15 de octubre de 1957, la URSS acordó proveer a China una bomba atómica y la documentación para su producción. Sin embargo, para 1960 las diferencias entre ambos países hicieron que toda colaboración se detuviese y no se concretó la provisión. A pesar de la pérdida de la ayuda soviética, en octubre de 1964 China ensayó con éxito un arma nuclear, a la cual denominaron 59-6, en referencia al año y el mes en que Nikita Krushchev, en ese entonces primer soviético, se negó a la provisión de lo prometido.

Apenas 32 meses después de ese ensayo, China probó su primer dispositivo termonuclear el 17 de junio de 1967. Este es un logro notable dado que el lapso entre la primera prueba nuclear de Estados Unidos y su primera prueba termonuclear fue de 86 meses, para la URSS fue de 75 meses, para el Reino Unido 66 meses y para Francia 105 meses. El objetivo de China era producir un dispositivo termonuclear de al menos un megatón de rendimiento que pudiera ser lanzado por un avión o transportado por un misil balístico. Varias explosiones para probar diseños de armas termonucleares, características y aumento del rendimiento precedieron a la prueba termonuclear. El rendimiento de la prueba de 1967 fue de 3,3 megatonnes.

En 1974 la India llevó a cabo una explosión de un artefacto de plutonio de 12 kilotonnes. Esto demostró que la India tenía, en efecto, la capacidad para desarrollar armas nucleares, aunque se abstuvo de hacer ensayos durante más de dos décadas. En mayo de 1998 la India realizó una serie de cinco ensayos de varios artefactos nucleares explosivos. Es interesante destacar que uno de los dispositivos del ensayo de 1998 utilizó como explosivo nuclear una mezcla de Torio y Urano 233.

Debido a la capacidad nuclear de la India y la derrota sufrida ante ese país en la llamada Guerra de Liberación de Bangladesh, en 1972 Pakistán inició un programa de desarrollo de armas nucleares, inicialmente en la órbita de la comisión de energía atómica de Pakistán (PAEC), integrado por los miembros de un “Grupo de Física Teórica” (TPG). Desde 1974 a 1983 pasó a ser llamado Proyecto 706, nombre código asignado durante el gobierno de Zulfikar Ali Bhutto. A un costo de 450 millones

de dólares estadounidenses, proporcionados por Libia y Arabia Saudita, incluyó la construcción de varios centros de ensayo y producción que operaban en el máximo secreto, al mismo tiempo que infiltraban el programa nuclear iraní. Duró hasta que la PAEC llevó adelante su primer ensayo frío en 1983. Luego de la realización de numerosos ensayos de este tipo, finalmente en mayo de 1998 Pakistán detonó cinco artefactos nucleares.

Aunque no se ha confirmado ni negado oficialmente, se considera que Israel posee armas nucleares.

El último país en alcanzar capacidad nuclear ha sido Corea del Norte, el cual luego de retirarse del Tratado de No Proliferación Nuclear en 2003, hizo detonar una bomba nuclear de tipo desconocido en 2006 y otra en 2009.

Otro país que poseyó armas nucleares 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 que destruyó las seis bombas que había construido en la década anterior.

Tipos de armas nucleares^{2,3}

Las armas nucleares se clasifican, por su diseño, en tres tipos:

> De fisión

Son las llamadas bombas atómicas o A-bombs. Utilizan material físil (U^{235} o Pu^{239}).

Son las únicas que han sido utilizadas en guerra.

> De fusión

Son las llamadas bombas termonucleares o H-bombs. En realidad, son artefactos de fusión-fisión

> Combinadas

Son bombas de fisión-fusión en las que, por diseño, se maximizan ciertos efectos por encima de otros. Ejemplos: bomba limpia, bomba sucia, bomba de neutrones, bomba de cobalto, etc.

Generalidades

Las armas nucleares emplean dos tipos de reacciones nucleares: fisión nuclear y fusión nuclear.

Fisión nuclear

En la fisión nuclear, como muestra la figura, un átomo de un elemento pesado físil (U^{235} o Pu^{239}) es impactado por un neutrón, lo que da como resultado final dos fragmentos de fisión, dos o tres neutrones libres, y energía, que se manifiesta en energía cinética de los productos de la reacción.

La energía resultante es de aproximadamente 200 MeV y es la resultante de la pérdida de masa Δm dada por la ecuación de Einstein: $\Delta E = c^2 \times \Delta m$. Como comparación, la energía liberada por el quemado (oxidación) de un átomo de carbono es de 2 o 3 eV, es decir que fisionar un kilo de uranio libera la energía equivalente a quemar 100×10^6 kg de carbón.

Una reacción de fisión en cadena se produce cuando los dos o tres neutrones producidos en la primera reacción, a su vez, provocan la fisión de dos o tres átomos de uranio adyacentes, lo

² Arguello, Luis Roque, Tecnología de las Armas Nucleares y Radiológicas, Postgrado en Desarme y No-proliferación, Fundación NPS Global – No Proliferación para la Seguridad Global, 2012

³ Knief, Ronald, Nuclear Engineering, Theory and Technology of Nuclear Power, Taylor & Francis, Washington, 1984

que libera dos o tres neutrones en cada una, que fisionan seis a nueve átomos adyacentes y así sucesivamente, se propaga la reacción hasta que, teóricamente, se agota el material físil. Si se tiene en cuenta que cada reacción de fisión se lleva a cabo en un lapso de 10^{-12} segundos, una reacción en cadena puede liberar una enorme cantidad de energía en forma prácticamente instantánea.

Se denomina “masa crítica” a la cantidad mínima de material físil requerida para mantener una reacción en cadena autosustentada, una vez iniciada con una fuente externa de neutrones. En general, una masa crítica tiene forma esférica, porque es la forma que, dada una cierta masa de material, ofrece la menor superficie libre. En una masa menor que la crítica (subcrítica), más neutrones escapan por la superficie libre que los que son producidos en la masa (volumen) y la reacción se detiene en forma natural. La masa crítica de U^{235} es una esfera de 56 kilos, y la de Pu^{239} es de 13 kilos.

Fusión nuclear

La reacción de fusión nuclear es la opuesta de la de fisión nuclear. En ella, dos núcleos livianos, generalmente isótopos de hidrógeno, se unen para formar un núcleo más pesado y estable, generalmente helio, liberando energía en forma de energía cinética:



El isótopo H^2 es conocido como Deuterio (D) y el de H^3 como Tritio (T).

La particularidad de estas reacciones de fusión es que para que se produzca esa fusión de núcleos se debe vencer la repulsión electrostática mutua, ya que ambos tienen carga eléctrica positiva. Para que esto pueda producirse, los núcleos deben tener una energía cinética altísima, lo que se produce a temperaturas de millones de grados centígrados. En ese estado, la materia pasa de estar en estado gaseoso (moléculas libres) al estado de plasma ionizado (electrones libres + núcleos libres). Esta condición se da, en forma natural, en el núcleo de las estrellas.

En la siguiente tabla, se muestran las reacciones de fusión más comunes.

FIGURA: REACCIÓN DE FISIÓN NUCLEAR

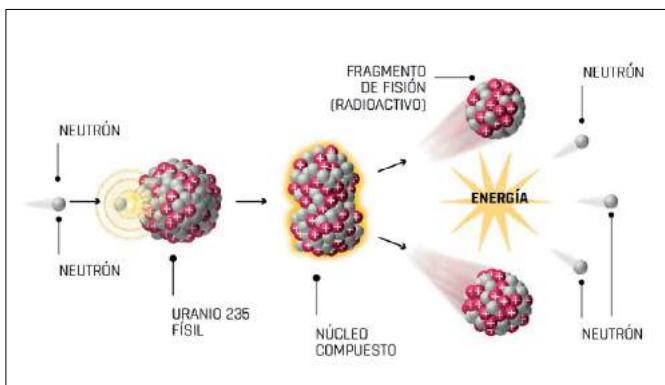


FIGURA – REACCIÓN DE FUSIÓN NUCLEAR

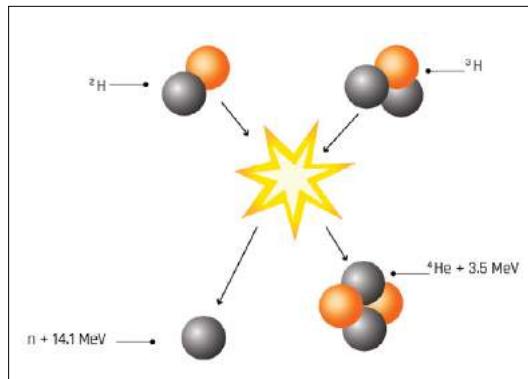


FIGURA: REACCIÓN DE FISIÓN NUCLEAR

Reacción	Umbral de E del plasma (KeV)	Energía Específica (MeV)
$D + T \rightarrow He^4 + n^0$	10	17.6
$D + D \rightarrow He^3 + n^0$	50	3.2
$D + D \rightarrow T + p^+$	50	4.0
$D + He^3 \rightarrow He^4 + p^+$	100	18.3

Una energía de 10 KeV equivale a una temperatura de aproximada de 100×10^6 °C, según la fórmula $E=3/2 kT$ donde k es la constante de Boltzmann ($k=8.6 \times 10^{-8}$ KeV/K)

Una energía de 10 KeV equivale a una temperatura de aproximada de 100×10^6 °C, según la constante de Boltzmann ($k=8.6 \times 10^{-8}$ KeV/K)

En la reacción de fusión, no hay conceptos equivalentes a los de “reacción en cadena” o “masa crítica” de la reacción de fisión. Basta poner una cierta masa de gas en las condiciones de temperatura adecuadas para que se inicie la reacción. Como se verá más adelante, en un artefacto de fusión, esas condiciones de temperatura las genera un artefacto de fisión iniciador.

Bombas de fisión

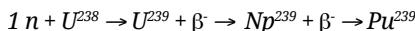
Para fabricar una bomba de fisión se requiere una cantidad material fisil (U^{235} , Pu^{239} , Pu^{241} o U^{233}) superior a la masa crítica, y un mecanismo de ensamblado.

Material fisil

Se denomina material fisil a aquel que fisiona con neutrones de cualquier energía cinética. El U^{235} es el único material fisil presente en la naturaleza. Se encuentra en el uranio natural con una abundancia isotópica del 0,7 por ciento. El resto del uranio natural es U^{238} que solo fisiona con neutrones de muy alta energía ($E_{cin} > 1$ MeV), y es lo que se denomina material fisionable, por lo que no sirve para construir un artefacto nuclear.

El U^{235} se obtiene del uranio natural a través del proceso físico de enriquecimiento, que puede ser por difusión gaseosa a través de una membrana porosa, o por ultracentrifugación. El grado de enriquecimiento necesario para construir un artefacto nuclear debe ser mayor a 90 por ciento en U^{235} . En aplicaciones civiles, los reactores nucleares utilizan uranio enriquecido a menos de 5 por ciento.

El otro material fisil utilizado es el plutonio. Éste es un metal artificial (no existen minas de plutonio) que se obtiene de irradiar uranio natural o levemente enriquecido (LEU: Low Enriched Uranium) en reactores nucleares, mediante la absorción de neutrones en U^{238} :



En realidad, lo que se obtiene del combustible quemado de un reactor nuclear, son varios isótopos de plutonio con las siguientes abundancias relativas aproximadas: 60 por ciento de Pu^{239} (fisil), 30 por ciento de Pu^{240} (fisionable), 7 por ciento de Pu^{241} (fisil) y 3 por ciento de Pu^{242} (fisionable). El proceso más común para extraer el plutonio del combustible quemado de un reactor nuclear es un proceso químico denominado PUREX (Plutonium Uranium Extraction), en el que se disuelve el combustible en ácido nítrico y luego se extrae el plutonio puro usando solventes de extracción.

También se puede fabricar un arma nuclear utilizando U^{233} fisil. El U^{233} se obtiene de irradiar Torio (Th^{232}) en un reactor nuclear. El Torio es un elemento fisionable presente en la naturaleza en proporción incluso mayor que el uranio. En general no se utiliza el Torio porque el proceso químico de extracción del U^{233} es más complicado que el de obtener Plutonio. La India tiene abundantes reservas de Torio y es el único país que, hasta ahora, detonó un artefacto de U^{233} .

Mecanismo de ensamblado

El objetivo del mecanismo de ensamblado es:

- > Mantener el material físil en una configuración subcrítica hasta el momento de la detonación.
- > Llevar al material físil a una configuración supercrítica en el momento de la detonación, y mantenerlo en esa configuración el tiempo suficiente como para que la explosión inicial no separe las masas nuevamente a configuración subcrítica. Esto se logra comprimiendo el material físil mediante explosivos convencionales.
- > Introducir neutrones en la masa supercrítica mediante una fuente de neutrones.

Ensamble de cañón

Consiste en dos masas subcríticas separadas por un conducto. La detonación de un explosivo convencional impulsa la bala de material físil dentro del conducto y la incrusta en la esfera subcrítica, formando una configuración supercrítica. La fuente de neutrones puede estar constituida por una mezcla de Polonio 210 (Po^{210}) y Berilio. El Polonio decae naturalmente emitiendo partículas α ($\text{Po}^{210} \rightarrow \text{Pb}^{206} + \alpha$) y el Berilio reacciona con las partículas α produciendo neutrones libres. Los neutrones libres producen la fisión en cadena de la masa supercrítica.

La eficiencia de este tipo de ensamblado es baja, de 1,5 por ciento, porque la compresión del conjunto supercrítico no es muy alta dada la relativamente baja velocidad que alcanza la bala de físil, lo que resulta en que queda material remanente sin fisionar.

La bomba atómica arrojada sobre Hiroshima, Little Boy, consistió en un ensamble cañón con U^{235} .

Dada su baja eficiencia, en la actualidad, el ensamble cañón solo se utiliza en armas tácticas de artillería, dado su menor tamaño relativo.

Ensamble de implosión

El explosivo convencional detona y comprime las masas subcríticas para formar una esfera supercrítica.

La eficiencia de este mecanismo es de alrededor del 20 por ciento, ya que permite una compresión mayor de la masa supercrítica. Como contrapartida, la precisión del proceso de implosión de las masas subcríticas debe ser alta.

La bomba atómica arrojada sobre Nagasaki, Fat Man, consistió en un artefacto de implosión con Pu^{239} .

FIGURA - ENSAMBLE CAÑÓN

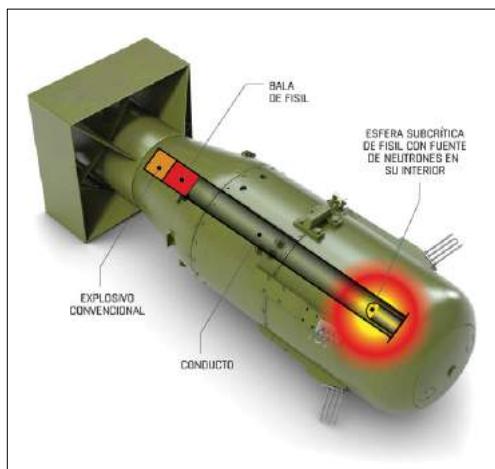
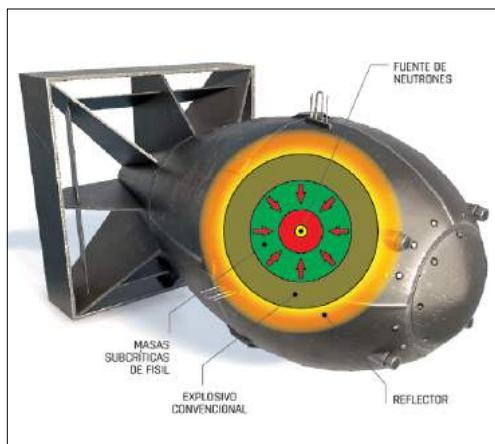


FIGURA - ENSAMBLE DE IMPLOSIÓN



Las dimensiones de las bombas Little Boy (imagen izquierda) y Fat Man (imagen derecha) pueden observarse en la siguiente fotografía.

Las bombas de fisión tienen un límite práctico de 500 kT.

Bombas de fusión

El diseño más común de los artefactos de fusión es el denominado de Teller-Ulam, como el que se muestra en la siguiente figura.

La Etapa A muestra la configuración inicial: una bomba de fisión con ensamblaje de implosión que servirá como iniciante, y un eje de Pu²³⁹ rodeado de deuterio de litio (DLi). Se utiliza DLi porque es un sólido más fácil de almacenar que el tritio y el deuterio puros.

Producida la explosión de fisión, los rayos X producidos comprimen el DLi y el eje de Pu²³⁹, como se muestra en la Etapa B.

Como muestra la Etapa C, la compresión produce la fisión del Pu²³⁹, lo que produce neutrones que irradian el DLi produciendo Tritio según:



Finalmente, se produce la reacción de fusión del Deuterio y el Tritio.

FIGURA - LITTLE BOY (IZQ) Y FAT MAN (DER)

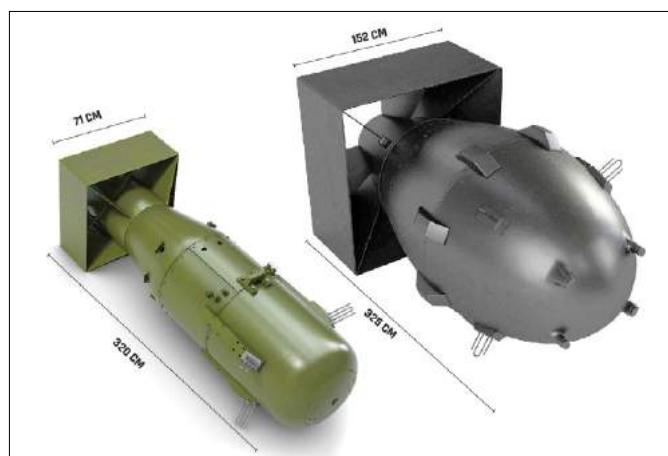
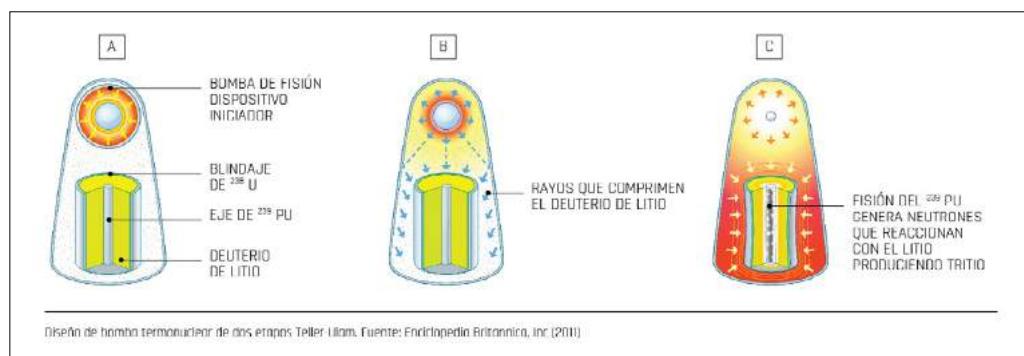


FIGURA - BOMBA DE FUSIÓN - DISEÑO TELLER-ULAM



Las bombas de fusión pueden llegar a tener potencias de megatones. El primer ensayo de una bomba de fusión lo llevó a cabo Estados Unidos en 1952, con el artefacto Ivy-Mike, de 10 MT. El artefacto nuclear de mayor potencia jamás probado fue la bomba de fusión Tsar, de 50 MT, detonada por Rusia en 1961.

Bombas combinadas

Bomba limpia

Es una bomba en tres etapas fisión-fusión-fusión, lo que le otorga un rendimiento cercano al 97 por ciento. Se denomina “limpia” porque reduce el efecto de lluvia radioactiva (se verá más adelante, en el capítulo Efectos), mediante el uso de otros metales pesados como plomo o tungsteno como blindaje, en lugar de Urano.

Bomba sucia

Es una bomba en tres etapas fisión-fusión-fusión, que se utiliza para maximizar el efecto de lluvia radioactiva o fallout.

Bomba de neutrones

Es una bomba de fisión diseñada para minimizar los efectos mecánico-térmicos (onda de blast y onda térmica) y maximizar la radiación de neutrones. Es llamada en inglés *Enhanced Radiation Weapon* (ERW). Su potencia puede ser tan baja como 1 kT.

Fue diseñada por Estados Unidos para enfrentar la amenaza de las divisiones blindadas del Pacto de Varsovia sobre Europa. Su baja potencia minimizaría los daños materiales en terreno europeo, mientras que su radiación maximizada de neutrones atravesaría los blindajes y provocarían bajas en las tripulaciones de los tanques.

Bomba de Cobalto

Es una bomba de fusión rodeada por una carcasa de Cobalto. El Cobalto natural (Co^{59}) absorbe los neutrones y se transforma en Co^{60} radioactivo:



De esta forma se maximiza el efecto de *fallout*.

Efectos de las armas nucleares^{4,5}

Los efectos de las armas nucleares son:

- > Efectos inmediatos: onda de choque (*blast*), onda térmica, radiación instantánea y pulso electromagnético.
- > Efectos retardados: lluvia radioactiva o *fallout*, cambios en el clima.

La intensidad de los efectos depende de:

- > Tipo de artefacto: el diseño del arma nuclear puede tener como objetivo aumentar o disminuir determinados efectos (ver tipos de armas nucleares).
- > Potencia del artefacto (*yield*).

⁴ Arguello, Luis Roque, Tecnología de las Armas Nucleares y Radiológicas, Postgrado en Desarme y No-proliferación, Fundación NPS Global – No Proliferación para la Seguridad Global, 2012

⁵ Glasstone, Samuel and Dolan, Philip J., The Effects of Nuclear Weapons (third edition), U.S. Government Printing Office, 1977; <http://www.princeton.edu/~globsec/publications/effects/effects.shtml>

- > Altura de la explosión: a mayor altura mayores efectos, hasta una altura óptima.
- > Tipo de terreno: en llanura los efectos son mayores que en terreno montañoso.

Onda de choque

Es una onda de presión mecánica que se propaga radialmente a la velocidad del sonido (1224 km/h). Se produce porque las partículas expulsadas por la bomba a gran velocidad transfieren su energía cinética al aire y al entorno.

La variable que determina el grado de daño es la sobrepresión, que depende de la distancia al punto cero. Una fórmula para estimar la sobrepresión es:

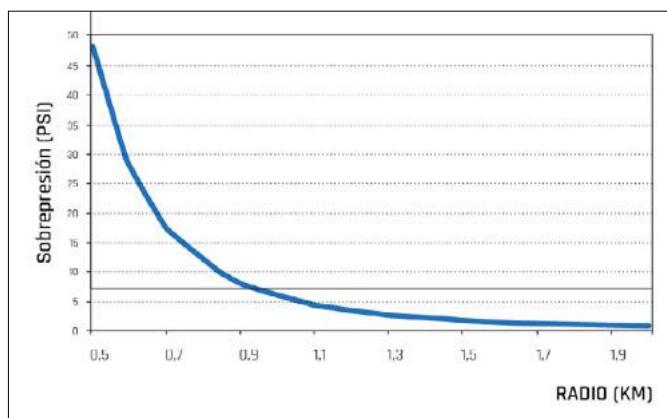
$$p = \frac{(6Y)}{R^3}$$

donde p es la sobrepresión en psi (1 psi = 0.068 atmósferas), Y es la potencia en megatones y R la distancia al punto cero en kilómetros.

El siguiente gráfico muestra un ejemplo calculado para una potencia de 1 MT.

Se estima que una sobrepresión mayor de 20 psi provoca destrucción total y 98 por ciento de muertos; entre 20 y 10 psi hay edificios caídos y 50 por ciento de muertos; entre 10 y 5 psi hay vidrios y paredes rotas con 25 por ciento de muertos, y entre 5 y 3 psi hay daños leves, vidrios rotos y 5 por ciento de muertos.

FIGURA - SOBREPRESIÓN EN FUNCIÓN DEL RADIO - $Y = 1$ MT



Onda térmica

La onda térmica se produce por la radiación emitida por la explosión, y se propaga en forma radial a la velocidad del sonido.

Se puede estimar el efecto térmico en humanos mediante las siguientes ecuaciones semiempíricas:

- > Quemaduras de primer grado: $R = 1,20 Y^{0.38}$, R en km, Y en kT
- > Quemaduras de segundo grado: $R = 0,87 Y^{0.40}$
- > Quemaduras de tercer grado: $R = 0,67 Y^{0.41}$

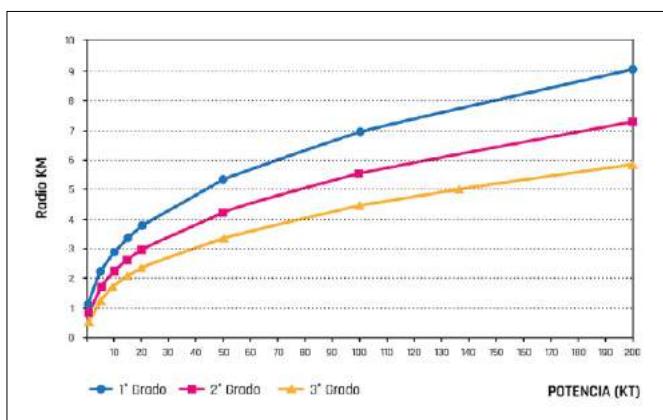
Quemaduras de primer grado: No hay destrucción de tejidos, dolor inmediato, enrojecimiento de la piel. Recuperación en horas.

Quemaduras de segundo grado: Afecta tejidos de la dermis, alguna necrosis. Dolor inmediato, enceguecimiento por horas, recuperación en días.

Quemaduras de tercer grado: Necrosis de tejidos de la piel. Serios riesgos de infección, pérdida de fluidos, fatalidad si abarca un porcentaje importante del cuerpo

La siguiente figura muestra un ejemplo calculado:

FIGURA - EFECTOS TÉRMICOS EN FUNCIÓN DEL RADIO Y LA POTENCIA

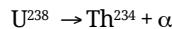


Radiación instantánea

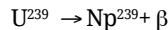
Esta radiación es, como su nombre lo indica, instantánea, y se desplaza a la velocidad de la luz.

Está compuesta por radiación α , β , γ y neutrones, emitida en las reacciones de fisión y fusión, y por los decaimientos radioactivos subsecuentes.

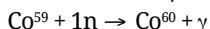
El decaimiento α es la emisión de núcleos de He⁴:



El decaimiento β es la emisión de electrones:



El decaimiento γ es la emisión de radiación electromagnética (sin masa ni carga):



La emisión de neutrones se produce en las reacciones de fisión y fusión.

Cada una de estas radiaciones está caracterizada por una energía que depende del núcleo padre que decayó. A mayor energía es mayor el daño que se produce en el ambiente (activación por radiación) o en el ser humano.

A su vez, las radiaciones también están caracterizadas por un determinado poder de penetración en la materia. Las partículas cargadas (α y β) tienen menor poder de penetración y pueden frenarse en una plancha fina de centímetros de materia (madera, aluminio, etc.). La radiación sin carga (γ y neutrones) tiene un mayor poder de penetración, y para frenarla hacen falta espesores considerables de distintos blindajes (plomo, hormigón, etc.).

El efecto de la radiación sobre el ser humano, o dosis, depende de tres factores:

- > Actividad de la fuente radioactiva. Es la cantidad de desintegraciones por segundo que produce una determinada fuente radioactiva. Se mide en Curie (Ci). 1 Ci = 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo. Una masa de aproximadamente 1 gr de Co60 tiene una actividad γ de 1 Ci.
- > A mayor actividad de la fuente de radiación, mayor es el efecto y el daño.
- > Energía de la radiación. Depende del núcleo padre que decae. A mayor energía de la radiación, mayor es el efecto y el daño.
- > Tiempo de exposición. A más tiempo, mayor daño.

Las dosis en el cuerpo humano se miden en Rems, y tiene en cuenta la cantidad de energía absorbida por kilogramos de masa biológica, ponderada por el EBR (Eficacia Biológica Relativa).

La dosis máxima recomendada para un ser humano es de 5 Rem/año.

Mayores dosis pueden provocar los siguientes efectos:

- > **100 a 200 Rem:** Náuseas, pérdida de apetito, fatiga, infertilidad masculina temporaria. Recuperación: semanas.
- > **200 a 400 Rem:** Aumento de mortalidad. Náuseas, vómitos, tejidos órganos productores de sangre, esterilidad masculina. Recuperación: meses

- > 400 a 600 Rem: La mortalidad crece abruptamente (50 a 90 por ciento) Período latente: 7 – 14 días. Se agrega infertilidad femenina. Recuperación: meses
- > 600 a 1000 Rem: Sobrevivencia sólo con tratamiento médico (injerto de médula). Náuseas, vómitos, cabello, diarrea, hemorragias. Período latente: 5 – 10 días. Recuperación: varios meses.
- > Mayor a 1000 Rem: Muerte de células del sistema gastrointestinal. Pérdida de fluidos. Desbalance eléctrico. Muerte en horas por colapso del sistema circulatorio.

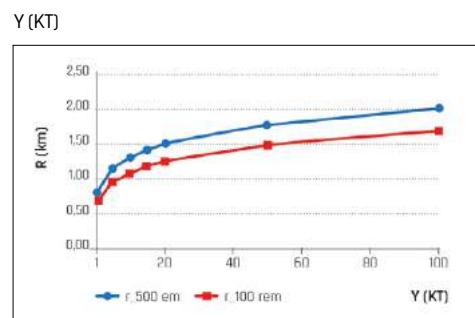
Para estimar los efectos de la radiación de los artefactos nucleares existen ecuaciones empíricas:

$$R_{500 \text{ Rem}} = 0.840 \times Y^{0.19}$$

$$R_{1000 \text{ Rem}} = 0.700 \times Y^{0.19}$$

con R en kilómetros y Y en kT

La siguiente figura muestra un cálculo con las ecuaciones:



Pulso electromagnético (EMP)

La radiación producida por un artefacto nuclear ioniza el aire circundante, es decir, arranca electrones a los átomos, lo que produce un alto flujo de electrones. Toda carga en movimiento genera un campo electromagnético asociado.

El pulso electromagnético generado es instantáneo y de gran magnitud. Puede inutilizar todos los equipos electrónicos alcanzados, aunque no estén conectados a una antena.

El efecto del EMP se magnifica con el aumento de altura de la explosión. Una detonación a 100 kilómetros de altura puede destruir el equipamiento electrónico no protegido en 1200 kilómetros a la redonda.

La única forma de proteger los equipos electrónicos del EMP es a través de una jaula de Faraday. No se ha demostrado que tenga efecto nocivo en los seres humanos.

Lluvia radioactiva o fallout

Una explosión nuclear levanta una enorme nube de polvo y cenizas. Las partículas de esa nube llevan adherido material radioactivo, en general productos de fisión.

La nube radioactiva es dispersada por los efectos meteorológicos, y los productos de fisión van cayendo, como lluvia, por efecto de la gravedad.

La radioactividad de un material decae exponencialmente con el tiempo, según:

$$C(t) = C(0) e^{-\lambda t}$$

donde C es la concentración, y λ es la constante de decaimiento que depende de cada isótopo.

Los efectos de la lluvia radioactiva sobre los humanos son los mismos que los de la radiación instantánea.

Materiales físiles - Producción^{6, 7, 8, 9}

Los isótopos que se pueden fisionar se clasifican en:

Isótopos físiles

Fisionan con neutrones de cualquier energía. El rango de energía de los neutrones libres va desde los eV o KeV (neutrones lentos) a los MeV (neutrones rápidos).

Los isótopos fisiles son: U²³⁵ (natural), Pu²³⁹ (artificial), Pu²⁴¹ (artificial) y U²³³ (artificial).

Isótopos fisionables

Solo fisionan con neutrones rápidos.

Los isótopos fisionables son: U²³⁸ (natural), Pu²⁴⁰ (artificial), Pu²⁴² (artificial) y Th²³² (natural).

Isótopos fériles

Son isótopos fisionables que, por absorción de un neutrón, generan isótopos fisiles.

Son el U²³⁸, del que se genera el Pu²³⁹, y el Th²³², del que se genera el U²³³.

Producción de Urano

El Uranio natural se compone de 99,3 por ciento de U²³⁸ y 0,7 por ciento de U²³⁵.

Las reservas mundiales de Urano se estiman en 5 millones de toneladas de reservas aseguradas y aproximadamente 17 millones de toneladas de reservas especulativas. Estas reservas aseguran una provisión de más de 100 años para la flota actual de reactores nucleares de potencia.

Las principales reservas de Urano se encuentran en Canadá, Australia, Kazakstán y Namibia.

En las minas de Urano, luego de los procesos de molienda (molido de la roca) y leaching (disolución en ácido sulfúrico), se obtiene la llamada “yellow cake” (U₃O₈).

El siguiente proceso es el de enriquecimiento, para obtener Urano enriquecido al 4 por ciento en U²³⁵ para los reactores de potencia, o enriquecido a más del 90 por ciento para los artefactos nucleares.

Los isótopos de Urano tienen las mismas propiedades químicas, pero masa, tamaño y peso ligeramente distintos. Los procesos físicos de enriquecimiento hacen uso de esta diferencia.

Los principales métodos son la difusión gaseosa y la ultracentrifugación. En ambos casos es necesario llevar al Urano a la forma de hexafloruro de Urano (UF₆). El UF₆ es gaseoso por encima de los 56 °C a presión atmosférica.

Difusión gaseosa

Consiste en hacer pasar el gas UF₆ a través de una membrana porosa. Las moléculas con U²³⁵ pasan más fácilmente por los poros por su menor masa y volumen, como se muestra en la siguiente figura.

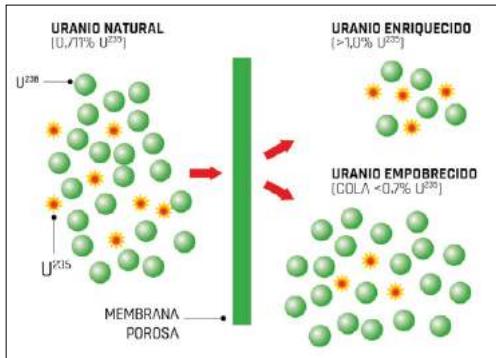
⁶ Arguello, Luis Roque, Tecnología de las Armas Nucleares y Radiológicas, Postgrado en Desarme y No-proliferación, Fundación NPS Global – No Proliferación para la Seguridad Global, 2012

⁷ Knief, Ronald, Nuclear Engineering, Theory and Technology of Nuclear Power, Taylor & Francis, Washington, 1984

⁸ IAEA, Nuclear Fuel Cycle Information System, <https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities>

⁹ Uranium 2016: Resources, Production and Demand, NEA (Nuclear Energy Agency), IAEA (International Atomic Energy Agency), <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>

FIGURA: ENRIQUECIMIENTO DE URANIO POR DIFUSIÓN GASEOSA

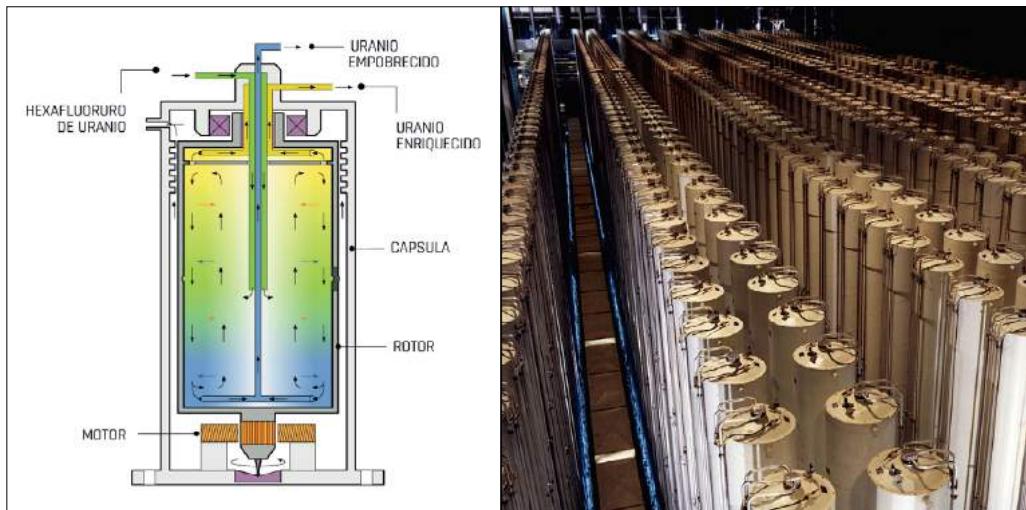


Como resultado del proceso se obtiene Urano enriquecido hasta el porcentaje buscado, y Urano empobrecido o depletado. El Urano depletado no tiene utilidad. A veces se lo emplea en la cabeza de proyectiles antitanque por su dureza y alta densidad.

Ultracentrifugación

El proceso de ultracentrifugación utiliza cilindros rotativos. Esta rotación crea una fuerza centrífuga muy fuerte, de modo que las moléculas más pesadas que contienen U²³⁸ se desplazan hacia la parte exterior del cilindro, mientras que las más ligeras del U²³⁵ se recogen más cercanas al centro. Este proceso requiere menos energía que el de difusión gaseosa para conseguir la misma separación, por lo que prácticamente lo ha reemplazado por completo.

FIGURA: ENRIQUECIMIENTO DE URANIO POR ULTRACENTRIFUGACIÓN



La siguiente tabla muestra una lista de las plantas de enriquecimiento de Urano operativas actualmente en el mundo.

TABLA – PLANTAS DE ENRIQUECIMIENTO DE URANIO EN EL MUNDO (IAEA – NFCIS)

País	Planta	Tipo	Capacidad (MTSUW/año)
Alemania	Urenco	GC	4500
Argentina	Pilcaniyeu	GD	20
Brasil	Resende	GC	120
China	CNNC	GC	1500
Francia	Eurodif	GD	7500
India	Rattehalli	GC	10
Irán	Notanz	GC	250
Japón	JNFL	GC	450
Países Bajos	Urenco	GC	6200
Paquistán	Kahuta	GC	5
Rusia	Tenex	GC	5000
UK	Urenco	GC	5000
USA	Paducah, Portsmouth, Urenco	GD, GC	21700

MTSUW (Metric Tonnes of Separative Work Units) es la unidad con que se mide la capacidad de una planta de enriquecimiento.

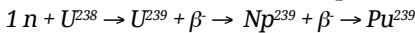
Una planta de cualquier capacidad puede producir Urano enriquecido al 90 por ciento para armas nucleares. A una planta de poca capacidad le llevará más tiempo que a una de gran capacidad.

Se denomina Low Enriched Uranium (LEU) al Urano enriquecido hasta el 20 por ciento, Highly Enriched Uranium (HEU) al enriquecido a más del

20%, y Weapon Grade Uranium al enriquecido por encima del 90 por ciento. Todas las aplicaciones civiles de la energía nuclear emplean LEU.

Producción de Plutonio

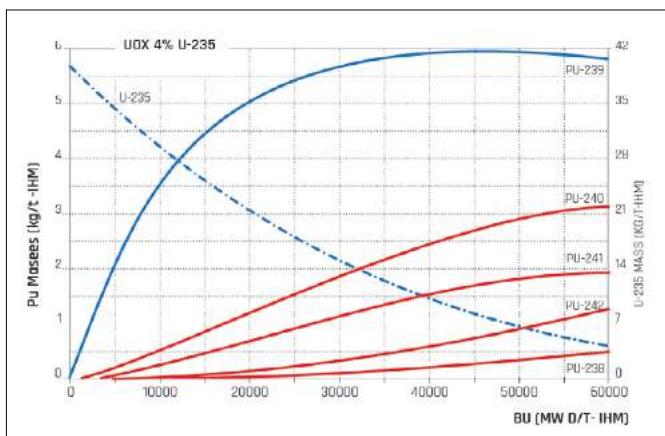
El Plutonio es un actínido artificial que se obtiene de la irradiación de U^{238} en los reactores nucleares:



Por absorciones sucesivas de neutrones se obtienen los siguientes isotopos de Plutonio: Pu^{240} (fisionable), Pu^{241} (físil) y Pu^{242} (fisionable).

La siguiente figura muestra la generación de los isótopos en función del grado de quemado del combustible (BU - burnup).

FIGURA – GENERACIÓN DE PLUTONIO EN EL COMBUSTIBLE NUCLEAR



Una vez extraído el combustible del reactor nuclear, se lo somete a un proceso químico denominado reprocesamiento, para extraer el Pu y el U, y separar el resto como desecho (productos de fisión). El proceso más común es conocido como proceso PUREX.

Este proceso consta de 4 etapas:

Etapa 1: decladding & chopping

A las barras cilíndricas de combustible quemado (spent fuel pin) se las corta en trozos (chopping) y se separan las vainas (de-cladding).

Etapa 2: chemical dissolution

Se disuelve todo en ácido nítrico.

Etapa 3: Extracción de Pu y U mediante el solvente Tributil Fosfato (TBP)

El TBP separa el Pu y U por un lado, y los productos de fisión (FP) por otro.

Etapa 4: Separation

En la última etapa, por medio de solventes de extracción específicos, se separa el Pu puro y el U puro.

Este proceso es muy sucio desde el punto de vista radiológico, ya que el combustible quemado es altamente radioactivo. Todo el proceso se lleva a cabo en forma remota, a través de brazos robóticos, en las que se denominan celdas calientes. Estas celdas son herméticas y tienen paredes y vidrios blindados de más de 60 centímetros de espesor, como se muestra en la siguiente figura.

Los siguientes países tienen, o han tenido, plantas de reprocesamiento de distinta escala (laboratorio, piloto o comerciales): Alemania, Argentina, Bélgica, Brasil, China, Corea del Norte, Francia, India, Italia, Japón, Rusia, Reino Unido y Estados Unidos.

En el caso de nuestro país, la planta piloto LPR (Laboratorio de Procesos Radioquímicos) ubicada en el Centro Atómico Ezeiza, tenía una capacidad de reprocesar cinco toneladas de metal pesado por año, y producir de 10 a 20 kilos de Pu por año. La planta nunca llegó a operar y fue clausurada en 1983. Brasil tuvo un laboratorio de reprocessamiento que dejó de operar en 1993.

El Plutonio obtenido de las plantas de reprocessamiento puede utilizarse puro, para artefactos nucleares, o en forma de PuO_2 como combustible de reactores nucleares.

Producción de U^{233}

El U^{233} es un isótopo fisil artificial del Urano. Se obtiene de irradiar Torio en un reactor nuclear. El Torio (Th^{232}) es un actínido fisionable natural, abundante en la naturaleza, incluso más que el Urano. Los principales yacimientos de Torio se encuentran en la India y en Brasil.

FIGURA - REPROCESAMIENTO PUREX

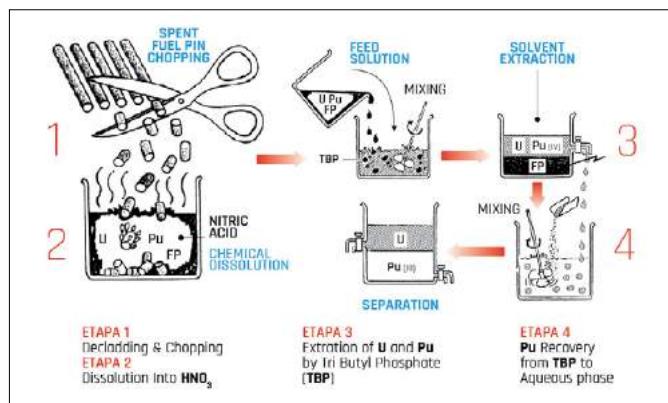


FIGURA - CELDAS CALIENTES DE REPROCESAMIENTO



El ciclo de combustible Th²³² - U²³³ casi no se utiliza, ni militar ni comercialmente (para reactores de potencia), porque el reprocesamiento para extraer el U²³³ del combustible quemado es muy complicado.

Países poseedores de armas nucleares¹⁰

La siguiente tabla muestra la lista de países que actualmente poseen armas nucleares.

- > Potencias nucleares firmantes del TNP (Tratado de No Proliferación) – Nuclear Weapon States: Rusia, Estados Unidos, Francia, Reino Unido y China.
- > Otros países con armas nucleares, no firmantes del TNP: India, Paquistán y Corea del Norte.
- > Israel, país no firmante del TNP, no declara ni niega oficialmente poseer armas nucleares, pero hay evidencia de que sí las posee.

- > Países que poseyeron armas nucleares

Sudáfrica construyó seis artefactos nucleares, pero los desmanteló a principios de los 90.

Bielorusia, Kazakstán y Ucrania alojaron, en total, más de 5000 artefactos nucleares de la ex URSS, que fueron transferidas a Rusia en 1995-1996.

- > Países sospechosos de tener programas nucleares clandestinos

Irán posee un reactor nuclear de potencia en Bushehr, sobre la costa del Golfo Pérsico. Es un PWR (uranio enriquecido y agua liviana) de 915 MWe, que opera desde 2011. Planifica construir dos más para 2027. Posee dos plantas de enriquecimiento de Urano por ultracentrifugación, una en Natanz y otra cerca de Qom, con una capacidad mediana (250 MTSWU - Metric Tonnes of Separative Work Units).

TABLA - PAÍSES POSEEDORES DE ARMAS NUCLEARES

País	Activas / Total	Estratégicas	Tácticas	A desmantelar	Primera prueba
Potencias nucleares - Firmantes del TNP					
USA	4950 / 7000	1950	3000	3000	1945
Rusia	4430 / 7415	2430	2000	2000	1949
UK	160 / 225	160	-	-	1952
Francia	300 / 300	240	60	-	1960
China	178 / 250	138	40	-	1964
Países con armas nucleares - No firmantes del TNP					
India	60 - 80	s/d	s/d	-	1974
Paquistán	90 - 110	s/d	s/d	-	1998
Corea del Norte	20 - 30	s/d	s/d	-	2006
Países con armas nucleares sin declarar - No firmantes del TNP					
Israel	60-200	s/d	s/d	-	1979

¹⁰ Norris, Robert S. and Hans M. Kristensen, Bulletin of the Atomic Scientists 2010, 2011, 2012 https://www.researchgate.net/publication/242697896_Bulletin_of_the_Atomic_Scientists

Irán firmó el Tratado de No Proliferación Nuclear y afirma que su interés en la tecnología nuclear, lo que incluye el enriquecimiento de uranio, es para fines civiles únicamente. Los países occidentales, principalmente Estados Unidos y el Reino Unido, sospechan que esto es un encubrimiento para un programa de armas nucleares, y afirman que Irán tiene poca necesidad de desarrollar energía nuclear, teniendo en cuenta sus reservas aseguradas de petróleo.

La producción de energía eléctrica de Irán, estimada en 26000 MWe, se basa en un 92 por ciento en derivados del petróleo y del gas, y en un 8 por ciento en carbón y energía hidráulica. El mercado energético iraní está controlado en un 100 por ciento por el Estado, a través del Ministerio iraní de Energía.

Sus reservas de petróleo ascienden a 125800 millones de barriles, lo que equivale a un 10 por ciento de las reservas mundiales, y exporta 2.7 millones de barriles por día (es el cuarto exportador mundial).

En base a estas últimas consideraciones, resulta llamativo que un país como Irán, totalmente autosuficiente en materia energética, decida embarcarse en un programa nuclear.

El 9 de enero de 2006, en abierto desafío a la comunidad internacional, el gobierno iraní dio las instrucciones de romper los sellos de seguridad instalados por el OIEA en sus instalaciones nucleares y reanudó las actividades de desarrollo.

El 31 de julio de 2006, el Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas promulgó la Resolución 1696, en la que reclamó que Irán otorgara al OIEA pleno acceso a todas las instalaciones y suspendiera todas las actividades de enriquecimiento, cosa que Irán no cumplió.

En julio de 2015 se anunció el acuerdo histórico Joint Comprehensive Plan of Action (JCPOA) comúnmente conocido como acuerdo Programa nuclear Iraní, entre Irán y el grupo P5+1 (Rusia, China, Estados Unidos, Francia, Reino Unido y Alemania) aprobado posteriormente por la ONU de forma unánime el 20 de julio de 2015, el cual tiene como puntos clave por parte de Irán, deshacerse de 98 por ciento de su material nuclear, eliminar las dos terceras partes de las ultracentrífugas instaladas y la no producción de uranio enriquecido durante los próximos quince años. A cambio, se levantarían las sanciones económicas contra Irán.

El Organismo Internacional de Energía Atómica ha declarado que Irán mantiene la verificación y monitoreo vigente de las instalaciones nucleares. Sin embargo, Estados Unidos decidió no certificar el acuerdo JCPOA por mandato del presidente Donald Trump, quien argumentó defectos pese al cumplimiento por parte de Irán, lo cual mantiene duras tensiones diplomáticas entre Teherán y Washington.

> Países que se supone que tuvieron programas nucleares en el pasado

Se supone que los siguientes países han llevado a cabo programas nucleares militares, hasta distintos grados de desarrollo, aunque sin haber llegado a fabricar un artefacto nuclear: Alemania (Segunda Guerra Mundial), Argentina (1976-1983), Australia (abandonado en los 60), Brasil (1978-1985), Corea del Sur (1970-1975), Egipto (1954-1967), España (década del 60'), Iraq (décadas del 70 y 80), Japón (Segunda Guerra Mundial), Libia, Polonia, Rumania (década de los 80), Suecia, Suiza, Taiwán (interrumpido en 1988), Venezuela (1956-1958) y la ex Yugoslavia (hasta 1987).

Doctrina de empleo de las armas nucleares^{11,12}

Los orígenes de la estrategia nuclear se encuentran estrechamente vinculados con las teorías del poder aéreo desarrolladas durante la etapa de entreguerras (1918-1939) e implementadas durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Estas se fundamentaban en el potencial de los bombarderos estratégicos para penetrar las líneas enemigas y destruir sus centros de poder económico, político, civil o industrial, con el fin de minar la moral de la población, paralizar la sociedad y forzar la rendición del adversario sin requerir una larga y costosa campaña militar. La Segunda Guerra Mundial demostró que estas afirmaciones eran exageradas, puesto que las campañas aéreas sobre Alemania y Japón perturbaron el normal funcionamiento de ambos países, pero no consiguieron su rendición. Sin embargo, tras observar la devastación causada por las dos primeras bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki, los estrategas occidentales concluyeron que estos artefactos eran lo que necesitaba el poder aéreo para conseguir sus aspiraciones.

Período 1945-1949

Entre 1945 y 1949 Estados Unidos gozó del monopolio nuclear y mantuvo su superioridad frente a la Unión Soviética en el número y calidad de sus bombarderos. Esta situación le garantizaba la supremacía estratégica en caso de desatarse un conflicto, por lo que el armamento atómico se integró en los planes de contingencia de Estados Unidos. La Unión Soviética pareció mostrar indiferencia respecto al potencial de la nueva arma, a pesar de que Moscú había iniciado su programa nuclear cuando descubrió el proyecto atómico norteamericano. Formalmente, confiado en el poder de su inmenso ejército y en el declive del capitalismo, Moscú mantuvo intacta su estrategia convencional para invadir Europa en caso de desatarse una Tercera Guerra Mundial, a la vez que apoyaba los movimientos comunistas en distintos puntos del globo.

Política de represalia masiva

Cuando en 1949 la Unión Soviética detonó su primera bomba atómica, Estados Unidos constató la necesidad de adaptar su estrategia nuclear al nuevo escenario que se acababa de imponer. Por un lado, para conservar su superioridad atómica, aceleró el desarrollo de los artefactos termonucleares de fusión, mucho más devastadores que los artefactos de fisión. Por otro lado, ante la imposibilidad de frenar la expansión del comunismo, construyó una fuerza convencional capaz de medirse con el ejército soviético y garantizar la seguridad de los aliados europeos y asiáticos. Washington planteó una nueva estrategia de empleo del arma nuclear: la represalia masiva, que ofrecía una disuasión fuerte con un coste político, estratégico, militar y económico aceptable.

Definida en el año 1954 por el secretario de Estado norteamericano John Foster Dulles, la represalia masiva significaba una respuesta instantánea en cualquier punto del planeta y con todos los medios disponibles, frente a cualquier agresión enemiga. La determinación estadounidense por responder de forma desproporcionada debería disuadir a la Unión Soviética de iniciar cualquier acción armada, puesto que toda provocación, por muy limitada que esta fuera, supondría un ataque nuclear total. La doctrina fundamentada en el empleo masivo de armas nucleares debía permitir a Washington reducir el gasto en defensa sin descuidar los compromisos con sus aliados, ya que cualquier acción limitada soviética en los continentes europeo o asiático desataría una respuesta nuclear.

¹¹ Guillerm Colom, Armas nucleares y control de armas de destrucción masiva, 2012

¹² Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional (CESEDEN), España, La Guerra Nuclear, doctrina soviética y doctrinas occidentales, 1981

Los aliados de Washington acogieron con gran satisfacción la iniciativa porque vinculaba su seguridad nacional al paraguas nuclear norteamericano. Sin embargo, eran muchos los estrategas estadounidenses que dudaban de las implicancias de la represalia masiva para su propia seguridad, pues a causa de una crisis limitada en Europa podrían verse envueltos en una guerra nuclear total.

La detonación del primer artefacto termonuclear soviético en 1955, el lanzamiento de su primer satélite artificial en 1957, el despliegue de su primer misil balístico intercontinental (ICBM) en 1959 y la revelación de su estrategia militar (1962), convirtieron la doctrina de represalia masiva en obsoleta, puesto que en ese preciso instante Moscú no sólo disponía de la tecnología y los medios para lanzar armas atómicas a distancias intercontinentales, sino que sus estrategas militares creían firmemente que su país podía luchar y ganar una guerra nuclear total contra Estados Unidos. Ello significaba que la Unión Soviética ya estaba en condiciones de realizar un ataque nuclear con misiles contra Estados Unidos, para el cual no existía ningún tipo de defensa y cuya única respuesta posible era un contraataque nuclear. Esto ponía fin, entonces, a la doctrina de represalia masiva.

Respuesta flexible

En consecuencia, la disuasión mutua se convirtió en el elemento que marcaría la relación entre ambas superpotencias y la condición necesaria pero no suficiente del largo periodo de paz que se vivió durante la Guerra Fría.

Se introdujo, entonces, la idea de la respuesta flexible. Planteada inicialmente por el general Maxwell D. Taylor para superar la represalia masiva, dicha doctrina fue instaurada en el año 1961 por el presidente John F. Kennedy y mantuvo su vigencia hasta el fin de la Guerra Fría.

La respuesta flexible se fundamentaba en la posesión de una amplia gama de opciones que, proporcionales a la agresión sufrida, permitieran controlar la escalada bélica. La adopción de esta doctrina no sólo ofrecía al presidente de Estados Unidos varias opciones de respuesta militar, sino que dejaba espacio a una escalada graduada que superaba el automatismo implícito de la represalia masiva.

Planeada específicamente para desvincular la defensa norteamericana de la seguridad europea y posibilitar una guerra nuclear limitada entre la OTAN y el Pacto de Varsovia en este teatro de operaciones, la implementación de la represalia flexible requería tres grandes cambios en la estrategia estadounidense:

- > Un rearme convencional con el fin de retrasar el umbral nuclear.
- > Integrar en los planes de operaciones al armamento nuclear táctico. Este permitiría multiplicar el poder de las fuerzas convencionales sin incrementar excesivamente el costo financiero de la defensa.
- > Desarrollar una tríada nuclear que proporcionase múltiples opciones de respuesta y reforzar la disuasión nuclear. Esta tríada estaría compuesta por misiles balísticos intercontinentales, misiles balísticos de lanzamiento submarino y bombarderos de ataque nuclear estratégico

La estrategia de la represalia masiva y su sustitución por la respuesta flexible transcurrían en paralelo al aumento del arsenal nuclear de ambas superpotencias. El incremento en el número y potencial destructivo de los artefactos nucleares planteaba una nueva incógnita, ya que la estrategia más plausible para combatir y triunfar en un conflicto nuclear pasaba por realizar un ataque preventivo con todo el arsenal nuclear, con la esperanza de destruir las fuerzas nucleares del adversario y así imposibilitar cualquier contraataque. En consecuencia, los blancos más rentables para un ataque de estas características no serían objetivos como las industrias o las ciudades del

adversario, que podrían ser destruidas en ataques posteriores, sino sus silos de misiles y sus bases de bombarderos.

Conviene, a esta altura, introducir el siguiente glosario:

> **Misil Balístico Intercontinental - ICBM**

Un Misil Balístico Intercontinental (ICBM) es un cohete específicamente diseñado para el transporte de una o más ojivas nucleares, con un alcance superior a los 5.500 kilómetros. El desarrollo de esta arma estratégica se debió a la aplicación de los avances tecnológicos procedentes de la carrera espacial (combustibles, materiales y trayectorias) a la carrera de armamentos.

Inicialmente, la relativa imprecisión de estos misiles limitaba su fiabilidad para destruir los silos donde se protegían los ICBM enemigos. Sin embargo, con el paso de los años se produjeron importantes avances en sus sistemas de guía para garantizar impactos directos contra los silos de misiles enemigos; y se desarrollaron misiles equipados con ojivas múltiples (MIRV) que permitían destruir varios objetivos a la vez.

En términos generales, los ICBM se guardaban en silos fuertemente protegidos y eran especialmente indicados para asestar un primer golpe, dados su poder destructivo y virtual invulnerabilidad una vez que eran lanzados hacia sus objetivos. Sin embargo, los silos eran fijos y fácilmente detectables desde el aire, lo que los convertía en el primer objetivo de un hipotético ataque nuclear. Para reducir esta debilidad, se proyectaron ICBM montados sobre lanzaderas móviles.

> **Misil Balístico Lanzado desde Submarino - SLBM**

Un Misil Balístico Lanzado desde Submarino (SLBM) es el equivalente naval del ICBM basado en tierra. Con un alcance superior a los 5.500 kilómetros, los misiles son transportados y lanzados desde submarinos específicamente diseñados para este fin. La difícil detectabilidad de los submarinos lanzamisiles convierte a los SLBM en una estupenda arma de represalia y en el más temible elemento de la tríada nuclear, puesto que el misil puede lanzarse desde el mar y alcanzar sus objetivos en menos de diez minutos.

> **Bombardero estratégico**

Proyectado como el primer vector de lanzamiento del arma nuclear, un bombardero puede transportar una pesada carga bélica a grandes distancias y batir los objetivos con enorme precisión. Sin embargo, un avión es más lento y vulnerable que un misil balístico. Para superar estas limitaciones se desplegaron bombarderos en alerta permanente y se diseñaron aviones para penetrar dentro del territorio enemigo a baja altura (por ejemplo, el B-1 Lancer) y modelos indetectables por los radares (como el B-2 Spirit).

> **Tríada nuclear**

Este concepto surgió en Estados Unidos para definir los tres vectores (misiles balísticos intercontinentales, misiles balísticos de lanzamiento submarino y bombarderos) de ataque nuclear estratégico. Su posesión garantizaba la supervivencia del arsenal nuclear en caso de un ataque preventivo y posibilitaba la capacidad de contraataque, lo que reforzaba la disuasión.

> **Vehículo de Reentrada Múltiple e Independiente (MIRV)**

Un Vehículo de Reentrada Múltiple e Independiente (MIRV) es un dispositivo que permite

montar en un mismo misil balístico varias ojivas nucleares (o seúulos para distraer a los sistemas antimisil) capaces de batir distintos objetivos situados dentro de la trayectoria del vector. Así, las diversas cabezas de guerra se van separando del cuerpo central del misil en distintos momentos de su trayectoria de reentrada para alcanzar los objetivos que se encuentren dentro de su recorrido.

En un primer momento, ambas superpotencias intentaron proteger sus fuerzas nucleares acorazando los silos subterráneos, protegiendo los hangares aéreos y dispersando los arsenales contra un hipotético primer golpe enemigo, tratando de garantizar así su capacidad de contraataque. Sin embargo, estas medidas pasivas proporcionaban una limitada solución, puesto que tenían un escaso poder disuasorio. La clave radicaba en alcanzar una situación que garantizara la capacidad de respuesta nuclear y convirtiera en improbable e irracional cualquier ataque preventivo. En otras palabras, el objetivo era que ninguna de ambas superpotencias gozara de ventaja para lanzar un ataque nuclear y así lograr una situación de conflicto estable.

La solución a este problema se concretó en el desarrollo de una capacidad de respuesta efectiva mediante el incremento y dispersión de los arsenales para evitar que un ataque preventivo destruyera toda la fuerza nuclear; el desarrollo de mecanismos de represalia instantánea para iniciar el contraataque antes de que los misiles enemigos alcanzaran sus objetivos; y la construcción de nuevos vectores capaces de transportar el arma nuclear.

Aunque en un plano práctico este escenario posiblemente no se habría concretado, desde una perspectiva teórica las fuerzas de contragolpe garantizaban la estabilidad de la disuasión y permitían a Estados Unidos, y también a la OTAN, mantener la declaración de no ser el primer país en cruzar el umbral nuclear (*No First Use*) en caso de conflicto.

Disuasión Mutua - Destrucción Mutua Asegurada (MAD)

Cuando los arsenales nucleares de ambas superpotencias alcanzaron la paridad, sus fuerzas nucleares se organizaron en una tríada que garantizaba la capacidad de contragolpe y la disuasión unilateral dejó paso a la disuasión mutua, se alcanzó un punto de equilibrio estratégico basado en la Destrucción Mutua Asegurada (MAD). Según esta situación, un hipotético conflicto nuclear total significaría, inevitablemente, la destrucción de ambos contendientes (estimada en un 50-70 por ciento del complejo industrial y un 33-40 por ciento de la población). Este equilibrio disuadiría a las superpotencias de iniciar una guerra nuclear, puesto que ni Estados Unidos ni la URSS serían tan irrationales como para lanzar un ataque preventivo sabiendo que ellos también serían destruidos.

Aunque efectiva para garantizar la disuasión mutua y mantener la estabilidad global, la MAD no satisfacía a ninguna de las dos superpotencias, por lo que desde el primer instante buscaron erosionar dicha doctrina mediante iniciativas como la construcción de escudos antimisiles que protegieran el territorio nacional frente a los misiles atacantes, cambios en las estrategias de empleo de las armas nucleares, o doctrinas militares que posibilitaran el logro de los objetivos estratégicos sin provocar un conflicto nuclear generalizado. Sin embargo, ninguna de esas iniciativas consiguió superar la MAD, que mantuvo intacta su capacidad disuasoria hasta la caída del imperio soviético.

La primera de las iniciativas para superar el estancamiento de la MAD arrancó cuando, a finales de la década de 1970, la Unión Soviética planteó una arriesgada estrategia para permitir que el Pacto de Varsovia invadiera Europa sin que la OTAN pudiera responder con armamento nuclear. Ello se lograría mediante grandes ofensivas convencionales que deberían penetrar rápida y profundamente en el territorio aliado, lo que neutralizaría la opción nuclear y brindaría a Moscú una indiscutible victoria estratégica.

El planteamiento minaba tanto la escalada bélica como la disuasión nuclear, pilares de la estrategia aliada para mantener el statu quo en Europa. Ante esta situación, la OTAN propuso incrementar sus fuerzas convencionales y modificar su doctrina nuclear sustituyendo el principio de no ser la primera en cruzar el umbral nuclear (*No First Use*) por no traspasarlo de manera precipitada (*No Early First Use*), para así incrementar su capacidad de disuasión y dificultar una escalada bélica. Se decidió, entonces:

- > Aprovechar el potencial tecnológico occidental para equilibrar la superioridad cuantitativa del Pacto de Varsovia sin recurrir al arma nuclear.
- > Lanzar un ambicioso proyecto para incrementar y modernizar los medios convencionales aliados.
- > Establecer la doctrina de ataque a los segundos escalones (*Follow-On Forces Attack, FOFA*) para destruir las fuerzas de apoyo del Pacto de Varsovia en un conflicto convencional.

La segunda de las iniciativas para superar el estancamiento estratégico provocado por la MAD arrancó en 1979, cuando la Unión Soviética desplegó en su frontera occidental Misiles Balísticos de Alcance Intermedio (IRBM) RT-21M, capaces de batir cualquier punto del continente europeo. Basada en el supuesto de que Estados Unidos no intervendría por temor a una escalada militar y en la fuerza del movimiento pacifista para impedir cualquier respuesta aliada, esta arriesgada maniobra pretendía expandir la influencia de Moscú en Europa occidental. Esta acción paralizó a la OTAN, que no podía ofrecer ninguna réplica creíble al desafío porque su estrategia todavía se basaba en el paraguas nuclear estadounidense. En consecuencia, mientras la OTAN se debatía sobre cómo responder a esta provocación, Estados Unidos desplegó en suelo europeo sus misiles Pershing II armados con ojivas nucleares, lo que provocó enormes protestas pacifistas y antinucleares en todo el continente. La crisis de los euromisiles finalizó en 1987, cuando Estados Unidos y la Unión Soviética retiraron sus misiles y firmaron el Tratado de Fuerzas Nucleares de Alcance Intermedio, que proponía la eliminación total de este tipo de armas.

Doctrina de opciones selectivas

El tercer intento para superar la MAD se produjo en 1980, cuando el presidente Jimmy Carter presentó la doctrina de opciones selectivas. Concebida por el secretario de Defensa James Schlesinger en 1974, la estrategia pretendía eludir la contradicción de amenazar con armas nucleares en un escenario de paridad nuclear y Destrucción Mutua Asegurada. Planteaba la posibilidad de mantener un conflicto nuclear limitado que no escalara hacia una guerra nuclear total mediante la conducción de ataques nucleares limitados como prevención o respuesta a una agresión soviética. Encamionada a recuperar la dialéctica de la disuasión, la doctrina de las opciones selectivas pretendía garantizar la credibilidad de la amenaza estadounidense y lograr, en caso de conflicto, la rendición de la Unión Soviética para no exponerse a su hipotética destrucción. En otras palabras, las opciones selectivas eran la clave para triunfar en una guerra nuclear manteniendo, en última instancia, la MAD.

Para ser viable, dicha doctrina requería la elaboración de un catálogo de opciones de respuesta nuclear limitada y la adquisición de vectores capaces de conducir ataques de precisión. Durante la presidencia de Ronald Reagan (1981-1989) estas opciones se plasmaron en el establecimiento de la Selección de Objetivos para el Empleo de Armas Nucleares (NUTS), la entrada en servicio de nuevos sistemas de armas (el ICBM Peace- keeper, el SLBM Trident, el misil de crucero Tomahawk o el bombardero estratégico B-1 Lancer) y el impulso a la Iniciativa de Defensa Estratégica (SDI), un ambicioso sistema de defensa antimisil que prometía salvaguardar el territorio estadounidense frente

a cualquier ataque enemigo, alterando así el equilibrio del terror y reforzando la doctrina de las opciones selectivas. Estos principios constituirían el último aporte a la dialéctica nuclear y guiarían la estrategia nuclear estadounidense hasta el fin de la Guerra Fría.

Doctrina de disuasión mínima

Con la caída de la Cortina de Hierro, la teoría nuclear fue perdiendo importancia en el análisis estratégico internacional y el concepto de disuasión mínima, o la posesión de una capacidad de contragolpe suficiente como para ocasionar un daño inaceptable al agresor, se impuso entre las doctrinas nucleares de los países que mantenían niveles de fuerza suficientes para garantizar ese nivel de disuasión.

En esa época (década de los 90) los mayores temores de la comunidad internacional no se relacionaban con la disuasión, sino con la dispersión del arsenal nuclear soviético (originalmente repartido entre Rusia, Ucrania, Kazajstán y Bielorrusia), su control (para evitar fugas de científicos, materiales fisiles u ojivas nucleares), su seguridad (se temía que pudieran producirse detonaciones accidentales, no autorizadas o intencionales) y nuevos indicios de proliferación nuclear (lo que ponía en duda el régimen internacional de no-proliferación).

A mediados de la década de 1990, el arsenal nuclear soviético volvió a manos rusas, los materiales fisiles, la tecnología y los conocimientos científicos fueron puestos bajo control, y la seguridad nuclear rusa experimentó una notable mejoría. Sin embargo, el deterioro del régimen de proliferación nuclear ya era una realidad: Paquistán estaba a punto de obtener el arma nuclear y Corea del Norte e Irán estaban desarrollando programas nucleares para uso militar.

Finalmente, desde el cambio de siglo se han sucedido varios hechos que dieron lugar a un entorno nuclear más complejo:

- > El desarrollo de la Defensa de Misiles Balísticos estadounidense, su retirada del Tratado ABM (Misiles Antibalísticos) y su final renuncia a desplegar dicho sistema cerca de la frontera rusa.
- > Los esfuerzos de la OTAN por dotarse de un sistema antimisil análogo al estadounidense.
- > El progresivo deterioro del régimen internacional de no-proliferación motivado por el acceso de nuevos países al selecto club atómico.
- > La creciente dificultad para controlar la transferencia de tecnologías nucleares o de doble uso.
- > El esfuerzo de Irán por dotarse de artefactos nucleares y la prospectiva de un entorno de disuasión multipolar en Oriente Medio.
- > El temor de que un actor no-estatal acceda al arma atómica y la imposibilidad de mantener la disuasión nuclear tradicional para hacer frente a esta amenaza.

En conclusión, en los próximos años es probable que asistamos al progresivo deterioro del régimen internacional de no-proliferación, la emergencia de nuevos estados nucleares y el surgimiento de un entorno de disuasión multipolar. Ello comportará la revisión de las doctrinas nucleares de las principales potencias, la redefinición de la disuasión y la revitalización de la teoría y la estrategia nuclear.

Otras doctrinas nucleares

- > Gran Bretaña puso sus fuerzas nucleares a disposición de la OTAN y planteó una interdependencia nuclear con Estados Unidos basada en el planeamiento nuclear de contingencia conjunto y la opción de empleo unilateral estadounidense.
- > Francia buscó su independencia nuclear mediante el abandono del paraguas nuclear aliado

y la creación de su propia fuerza atómica, la force de frappe, fundamentada en la represalia masiva. Actualmente, la doctrina nuclear francesa se ha asimilado en gran medida a la anglo-sajona.

- > China planteó una disuasión mínima capaz de hacer frente a la doble amenaza estadounidense y soviética.
- > Israel concibe la disuasión nuclear como una garantía de seguridad frente a sus vecinos árabes y su última prerrogativa, gracias a la opción Sansón: un ataque nuclear total contra sus adversarios en caso de que la integridad del país esté realmente en peligro.
- > India y Paquistán mantienen una disuasión mínima orientada a la conservación del statu quo, a pesar del creciente desequilibrio de poder a favor de Nueva Delhi y la inestabilidad sociopolítica que sufre Islamabad.
- > Corea del Norte pretende garantizar una disuasión mínima con un arsenal nuclear muy reducido, susceptible de emplearse como instrumento político al servicio del régimen de Pyongyang.

Acuerdos nucleares Estados Unidos - URSS

- > Tratado sobre Misiles Anti-Balísticos (ABM)

El Tratado sobre Misiles Anti-Balísticos o Tratado ABM fue un acuerdo entre los Estados Unidos y la Unión Soviética para limitar el número de sistemas de misiles antibalísticos (ABM) utilizados para defender ciertos sitios contra misiles con carga nuclear. El 26 de mayo de 1972 el presidente Richard Nixon y su par soviético Leonid Brézhnev, firmaron este tratado, que estuvo en vigor durante 30 años, hasta 2002, año en que Estados Unidos se retiró del acuerdo.

El objetivo del acuerdo era asegurar la vulnerabilidad de las partes firmantes. Se afirma que la certeza de que ambas partes podrían destruirse mutuamente mantuvo el frágil equilibrio durante la Guerra Fría. Se impusieron límites cuantitativos y cualitativos precisos respecto de los sistemas ABM que podían ser desplegados.

- > Tratado START I (Strategic Arms Reduction Treaty)

El START era un tratado entre Estados Unidos y la URSS que consistió en limitar el número de misiles nucleares que poseía cada superpotencia. Fue propuesto por el entonces presidente estadounidense Ronald Reagan, y finalmente firmado por George Bush. Por parte soviética el firmante fue Mijaíl Gorbachov. Fue firmado el 31 de julio de 1991, cinco meses antes del colapso de la Unión Soviética; sin embargo, no entró en operación sino hasta diciembre de 1994. El tratado establecía limitaciones en la cantidad de varios tipos de vehículos y cabezas nucleares que ambos países poseían.

- > Tratado START II

El START II es un acuerdo firmado en 1993 por George Bush y Borís Yeltsin, que prohibía el uso de los ICBM de cabezas múltiples (MIRV).

- > Acuerdos SALT (*Strategic Arms Limitation Talks*)

Los acuerdos SALT fueron dos encuentros de conversaciones bilaterales entre la Unión Soviética y Estados Unidos sobre el tema de control de armas, específicamente el de limitar las armas nucleares estratégicas y frenar la carrera armamentista. Hubo dos rondas de encuentros de conversaciones y acuerdos: SALT I (1969-1972) y SALT II (1972-1979).

Marco legal sobre las armas nucleares^{13, 14, 15, 16, 17}

Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares (TNP)

Este tratado, conocido como TNP, entró en vigor el 5 de marzo de 1970. Está basado en tres pilares fundamentales: la no-proliferación, el desarme y el uso pacífico de la energía nuclear.

Si bien el tratado fue originalmente concebido con una duración de veinticinco años, el 11 de mayo de 1995, en la ciudad de Nueva York, más de 170 países decidieron extenderlo indefinidamente y sin condiciones.

Está constituido por once artículos, de los cuales se resumen a continuación los más importantes:

> Artículo I:

Cada Estado poseedor de armas nucleares que sea Parte en el Tratado se compromete a no traspasar a nadie armas nucleares u otros dispositivos nucleares explosivos ni el control sobre tales armas o dispositivos explosivos, sea directa o indirectamente; y a no ayudar, alentar o inducir en forma alguna a ningún Estado no poseedor de armas nucleares a fabricar o adquirir de otra manera armas nucleares u otros dispositivos nucleares explosivos, ni el control sobre tales armas o dispositivos explosivos.

> Artículo II:

Cada Estado no poseedor de armas nucleares que sea Parte en el Tratado se compromete a no recibir de nadie ningún traspaso de armas nucleares u otros dispositivos nucleares explosivos ni el control sobre tales armas o dispositivos explosivos, sea directa o indirectamente; a no fabricar ni adquirir de otra manera armas nucleares u otros dispositivos nucleares explosivos; y a no recabar ni recibir ayuda alguna para la fabricación de armas nucleares u otros dispositivos nucleares explosivos.

> Artículo III:

Cada Estado no poseedor de armas nucleares que sea Parte en el Tratado se compromete a aceptar las salvaguardias estipuladas en un acuerdo que ha de negociarse y concertarse con el Organismo Internacional de Energía Atómica, a fin de verificar el cumplimiento del compromiso asumido en el Artículo II.

Cada Estado Parte en el Tratado se compromete a no proporcionar: a) materiales básicos o materiales fisionables especiales, ni b) equipo o materiales especialmente concebidos o preparados para el tratamiento, utilización o producción de materiales fisionables especiales, a ningún Estado no poseedor de armas nucleares, para fines pacíficos, a menos que esos materiales básicos o materiales fisionables especiales sean sometidos a las salvaguardias exigidas por el presente artículo.

> Artículo IV

Todas las Partes en el Tratado se comprometen a facilitar el más amplio intercambio posible de

13 IAEA, Tratado de No-Proliferación (TNP), <https://www.iaea.org/es/temas/tratado-sobre-la-no-proliferacion>

14 IAEA, Protocolo Adicional, <https://www.iaea.org/es/temas/protocolo-adicional>

15 Tratado de Tlatelolco, https://www.oos.org/36ag/espanol/doc_referencia/Tratado_Tlatelolco.pdf

16 Agencia Brasileño-Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares (ABACC), <https://www.abacc.org.br/es/>

17 Nuclear Suppliers Group (NSG), <https://nuclearsuppliersgroup.org/en/>

equipo, materiales e información científica y tecnológica para los usos pacíficos de la energía nuclear y tienen el derecho de participar en ese intercambio.

> Artículo VI

Cada Parte en el Tratado se compromete a celebrar negociaciones de buena fe sobre medidas eficaces relativas a la cesación de la carrera de armamentos nucleares en fecha cercana y al desarme nuclear, y sobre un tratado de desarme general y completo bajo estricto y eficaz control internacional.

A la fecha, 190 países han firmado el TNP, de los cuales cinco son Estados Poseedores de Armas Nucleares (Nuclear Weapon States – NWS): Estados Unidos, Rusia, Reino Unido, Francia y China. Estos cinco países son los que hicieron pruebas nucleares antes de 1967.

Tres países no han firmado, hasta ahora, el TNP: India, Paquistán e Israel. Corea del Norte se retiró del Tratado en 2003.

Sudáfrica empezó un programa de armas nucleares, supuestamente con la asistencia de Israel, y realizó pruebas nucleares en el Atlántico, pero tras la firma del TNP en 1990 renunció a su programa nuclear y destruyó su pequeño arsenal atómico.

El Artículo VI, referido al desarme de los NWS, está, a la fecha, incumplido.

Argentina firmó el TNP en el año 1995.

Acuerdos de Salvaguarda

Las salvaguardias nucleares son las medidas de examen y supervisión que son ejercidas sobre las instalaciones nucleares de un determinado país que permiten comprobar que su uso de la tecnología nuclear se orienta solo a fines pacíficos y no a un desarrollo militar.

Por medio del Tratado de No Proliferación Nuclear, la comunidad internacional asignó al OIEA la responsabilidad central de aplicar las salvaguardias con carácter universal.

Todo Estado firmante del TNP firma un acuerdo particular de salvaguarda con el OIEA. Ese acuerdo debe fijar, principalmente: las instalaciones sujetas a inspección, la frecuencia de las inspecciones, la duración y modalidad de las inspecciones, y el tiempo de preaviso de la llegada de las inspecciones.

Las medidas que se aplican para confirmar la ausencia de desvío del material nuclear son de carácter técnico y requieren la cooperación entre los Estados sujetos a las inspecciones y el OIEA. Entre estas medidas se destacan las siguientes:

- > Contabilidad, mediante actividades llevadas a cabo para controlar y registrar las cantidades de materiales nucleares presentes dentro de un área definida y los cambios habidos dentro de determinados períodos de tiempo.
- > Contención, consistente en la instalación de elementos estructurales en las instalaciones, contenedores o equipos con material nuclear que aseguren la integridad física de un área o un elemento específico y la continuidad del conocimiento del estado del área o del elemento, y que eviten el acceso no detectado y la interferencia o manipulación no autorizada del material nuclear o los equipos.
- > Vigilancia, consistente en las inspecciones y la recogida de información “in situ” por los inspectores del OIEA, registrada mediante dispositivos o instrumentos, con la finalidad de detectar la posible interferencia o manipulación no autorizada del material nuclear o los equipos, así como la interferencia o la manipulación del equipo de salvaguardias (sellos, muestras, cámaras de vigilancia, etc..).

Los criterios que se utilizan para determinar el número, rigor, duración, cronología y modalidad de las inspecciones ordinarias de cualquier instalación deberán tener en cuenta las características del ciclo del combustible nuclear del Estado, en especial el número y tipos de instalaciones que contengan materiales nucleares sometidos a salvaguardias en el Estado; las características de estas instalaciones que sean de interés para las salvaguardias, en particular el grado de contención; la medida en que el diseño de estas instalaciones facilite la verificación de la corriente y existencias de materiales nucleares, y la medida en que se pueda establecer una correlación entre la información procedente de distintas zonas de balance de materiales.

La frecuencia de las inspecciones depende del tipo de instalación y de la cantidad de material fisible involucrado.

El preaviso de las inspecciones por parte del OIEA depende del tipo de instalaciones que posea el país, pudiendo ser de entre 24 horas a una semana.

Protocolo Adicional al TNP

El Protocolo Adicional refuerza el sistema de salvaguardias; en primer lugar, mediante la posibilidad de recabar y recibir información adicional sobre las instalaciones nucleares y sobre actividades relacionadas con el ciclo de combustible nuclear, lo que incluye aquellas en las que no se utiliza material nuclear (esto abarca actividades como la investigación, fabricación de equipos, etc.), información que será evaluada por el OIEA; y en segundo lugar se refuerzan los derechos de acceso de los inspectores del OIEA a cualquier lugar dentro de los emplazamientos nucleares y aquellos lugares en los que se desarrollan actividades sujetas a declaración (acceso complementario), con el añadido del factor sorpresa, pasando de inspecciones programadas con varios días de antelación a inspecciones anunciadas con sólo de 2 a 24 horas de antelación.

Hasta la fecha, 148 estados han firmado el Protocolo Adicional al TNP. Ni Argentina ni Brasil han firmado el Protocolo Adicional, ya que alegan haber establecido, en su lugar, un régimen bilateral de inspecciones mutuas denominado ABACC (Agencia Brasileño Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares).

ABACC (Agencia Brasileño Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares)

La Agencia Brasileño-Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares se creó el 18 de julio de 1991, luego de la firma del Acuerdo entre Argentina y Brasil para el Uso Exclusivamente Pacífico de la Energía Nuclear. Este Acuerdo entró en vigor en diciembre de 1991, una vez aprobado por los Congresos de ambos países.

La principal misión de la ABACC es garantizar a la Argentina, a Brasil y a la comunidad internacional, que todos los materiales e instalaciones nucleares existentes en ambos países se emplean con fines exclusivamente pacíficos. El objetivo de la ABACC es administrar y aplicar el Sistema Común de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares (SCCC), cuyo propósito es verificar que ningún material utilizado en las distintas actividades nucleares de ambos países se desvíe para su empleo en armas nucleares.

El modo operativo de la ABACC es el de las inspecciones mutuas de salvaguardias, similares a las llevadas a cabo por el OIEA.

Tratado de Tlatelolco

El Tratado para la Proscripción de Armas Nucleares en América Latina y el Caribe (más conocido como Tratado de Tlatelolco) es un tratado internacional que establece la desnuclearización del territorio de América Latina y el Caribe de los países signatarios. Fue propuesto por el presidente de

Méjico, Gustavo Díaz Ordaz, e impulsado por el diplomático mexicano Alfonso García Robles como respuesta al temor generado por la crisis de los misiles rusos en Cuba (1962).

El Tratado, cuya redacción fue completada por la COPREDAL (Comisión Preparatoria para la Desnuclearización de América Latina) el 12 de febrero de 1967, fue puesto a disposición de los países para su firma el 14 de febrero y entró en vigencia el 25 de abril de 1969. La organización encargada de vigilar el cumplimiento de dicho tratado se denomina OPANAL (Organización para la Proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina y el Caribe).

Han firmado el Tratado 21 países de América Latina y el Caribe. No lo han firmado Cuba, Guyana ni Belice.

Grupo de Proveedores Nucleares (Nuclear Suppliers Group - NSG)

El Grupo de Proveedores Nucleares (Nuclear Suppliers Group – NSG) es un ente multinacional que busca contribuir a la no proliferación mediante el establecimiento de normas para el control de exportaciones y transferencias de tecnología nuclear que podrían ser utilizadas en un programa de fabricación de armamento nuclear.

El ente fue fundado en 1975 a raíz de las pruebas nucleares llevadas a cabo por la India en 1974.

Conforman el grupo 45 países, entre los que se incluyen Argentina y Brasil.

Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (CTBTO)

La Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (en inglés, CTBTO, Comprehensive Test-Ban-Treaty Organization) es una organización internacional fundada en 1997, que establecerá, tras la entrada en vigor del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (CTBT en inglés), una convención que prohíbe todas las explosiones nucleares por quien quiera que sea y en cualquier lugar, ya sea sobre la superficie terrestre, en la atmósfera, bajo el agua o bajo tierra. La organización se encargará de la verificación de la prohibición de pruebas nucleares y, por lo tanto, operará un sistema de monitorización en todo el mundo.

Esta convención entrará en vigor plenamente cuando la firmen los Estados faltantes: Estados Unidos y China.

La energía nuclear en América Latina^{18, 19, 20, 21}

Argentina

Argentina posee tres reactores nucleares de potencia, operados por la empresa estatal NASA (Nucleoeléctrica Argentina S.A.):

> Atucha I:

Tipo: PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor) con recipiente de presión; combustible: UO₂ con uranio levemente enriquecido (SEU: Slightly Enriched Uranium) al 0.85 por ciento; refrigerante: agua pesada (D₂O); potencia: 357 MWe; ubicación: Lima (100 kilómetros al norte de Buenos Aires); fabricante: KWU (Siemens, Alemania); en operación desde 1974.

¹⁸ Uranium 2016: Resources, Production and Demand, NEA (Nuclear Energy Agency), IAEA (International Atomic Energy Agency), <http://www.oecd-nea.org/dd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>

¹⁹ IAEA, Country Nuclear Power Profiles, <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Brazil/Brazil.htm> <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Argentina/Argentina.htm>

²⁰ World Nuclear Association, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/mexico.aspx>

²¹ World Nuclear Association, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/emerging-nuclear-energy-countries.aspx>

> Embalse:

Tipo: PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor) CANDU con tubos de presión; combustible: UO₂ con uranio natural; refrigerante: agua pesada (D₂O); potencia: 648 MWe; ubicación: Embalse (a 100 kilómetros de la ciudad de Córdoba); fabricante: AECL (Atomic Energy Canada Limited, Canadá); en operación desde 1986.

> Atucha II

Tipo: PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor); combustible: UO₂ con uranio natural; refrigerante: agua pesada (D₂O); potencia: 675 MWe; ubicación: Lima (100 kilómetros al norte de Buenos Aires); fabricante: KWU (Siemens, Alemania) y NASA (Nucleoeléctrica Argentina SA); en operación desde 2011.

Posee, además, un reactor nuclear de potencia en construcción, el CAREM 25 (Central Argentina de Elementos Modulares), propiedad de CNEA.

> CAREM 25:

Tipo: PWR (Pressurized Water Reactor); combustible: UO₂ con uranio enriquecido al 3.2 por ciento; refrigerante: agua liviana (H₂O); potencia: 27 MWe; ubicación: Lima (100 kilómetros al norte de Buenos Aires); fabricante: CNEA; se estima su operación a partir de 2023.

Este es un reactor de diseño argentino. Participan en su construcción varias empresas argentinas: IMPSA, Techint, Conuar, etc.

Argentina posee cinco reactores de investigación y producción de radioisótopos. Son de baja potencia y no producen energía eléctrica: RA0 (Universidad de Córdoba), RA1 (Centro Atómico Constituyentes), RA3 (Centro Atómico Ezeiza), RA4 (Universidad de Rosario), RA6 (Centro Atómico Bariloche).

Posee, además, un reactor de investigación y producción de radioisótopos en construcción, el RA10, en el predio del Centro Atómico Ezeiza. Se trata de un reactor de diseño argentino.

Los reactores de investigación utilizan combustible de UO₂ con Uranio enriquecido al 20 por ciento, que la Argentina compra en el mercado internacional.

La Argentina posee todas las instalaciones necesarias para proveer de combustible a sus reactores nucleares. Es lo que se denomina un ciclo de combustible autónomo. Comprende:

> Minería de uranio

Tiene 11020 toneladas de reservas aseguradas de Urano, y los principales yacimientos son: Don Otto (Salta), Sierra Pintada (Mendoza) y Cerro Solo (Chubut). Se producen 120 tonU/año aproximadamente. Los tres reactores consumen en total unas 210 tonU/año. La diferencia se importa principalmente de Canadá, Kazakastán y República Checa.

> Producción de UO₂

El U3O8 (yellow cake) que se obtiene en las minas de Urano se purifica y convierte en polvo de UO₂ en la planta de Dioxitek S.A., en la ciudad de Córdoba. La planta, que comenzó a operar en 1982, es propiedad del Ministerio de Energía (50 por ciento) y de la CNEA (50 por ciento).

> Producción de agua pesada

La empresa estatal ENSI (Empresa Neuquina de Servicios de Ingeniería) opera la planta PIAP (Planta Industrial de Agua Pesada), ubicada en la localidad de Arroyito, a 55 kilómetros de la ciudad de Neuquén.

La PIAP tiene una capacidad de 200 ton D₂O por año. Provee a los reactores nucleares argentinos y exporta el excedente.

> Enriquecimiento de Uranio

La planta de Pilcaniyeu (CNEA) a 60 kilómetros de Bariloche, enriquece Urano por la técnica de difusión gaseosa. El proyecto comenzó en 1978 y fue inaugurado en 1983. Tiene poca capacidad (20 MTSWU - Metric Tonnes of Separative Work Units), pero alcanzaría para enriquecer el Urano necesario para el reactor CAREM 25.

La planta discontinuó su actividad en 1984, pero la retomó en 2015.

> Fabricación de elementos combustibles

La planta de Conuar S.A. (Combustibles Nucleares Argentinos S.A.) es propiedad de CNEA (33 por ciento) y del grupo privado Pérez Companc (67 por ciento) y fue inaugurada en 1982. La planta recibe el polvo de UO₂ fabricado en Dioxitek S.A. y los tubos de zircalloy (aleación de Zr con 1 por ciento Nb y Sn) fabricados en FAE (Fábrica de Aleaciones Especiales, CNEA) y fabrica los elementos combustibles que alimentan los reactores argentinos de potencia. Los llamados elementos combustibles son manojo de tubos de zircaloy llenos con pastillas (pellets) de UO₂ cerámico, como muestra la siguiente figura.

> Reprocesamiento de combustible quemado

En 1978 se inició el proyecto LPR (Laboratorio de Procesos Radioquímicos) en el Centro Atómico Ezeiza, que tendría la capacidad de reprocesar combustibles quemados en los reactores argentinos y producir entre 10 y 20 kilos de Plutonio por año.

El proyecto se suspendió en 1984, pero sus instalaciones no fueron desmanteladas.

Si bien en la actualidad la Argentina no reprocessa su combustible nuclear quemado, mantiene el *know how* a escala de laboratorio.

FIGURA - ELEMENTO COMBUSTIBLE DEL REACTOR DE EMBALSE



> Almacenamiento de combustible nuclear quemado

El elemento combustible permanece dentro del núcleo del reactor por aproximadamente un año. Luego es extraído y colocado en piletas de agua donde seca térmica y radiológicamente. Algunos países extraen el combustible quemado después de un tiempo en piletas para reprocesarlo y obtener plutonio, sea para armas nucleares o para alimentar reactores nucleares. La Argentina mantiene los combustibles quemados almacenados en las piletas, y luego de varios años los transporta a un almacenamiento en seco (silos de hormigón).

Es importante destacar que Argentina no considera como "desecho" al combustible quemado, ya que contiene plutonio, que es una fuente de energía que, en el futuro, se puede aprovechar.

> Centros de investigación y desarrollo

CNEA mantiene tres centros de investigación y desarrollo en temas nucleares: Centro Atómico Constituyentes (CAC) en San Martín, provincia de Buenos Aires; Centro Atómico Ezeiza (CAE) en Ezeiza, provincia de Buenos Aires, y el Centro Atómico Bariloche (CAB) en Bariloche, provincia de Río Negro.

> Centros de formación de recursos humanos

CNEA mantiene tres centros de formación de recursos humanos: el Instituto Balseiro, en el CAB, en conjunto con la Universidad Nacional de Cuyo, el Instituto Dan Beninson, en el CAE, en conjunto con la Universidad Nacional de San Martín, y el Instituto Sábato, en el CAC, también en conjunto con la Universidad Nacional de San Martín.

En estos institutos se dictan carreras como licenciatura en física, ingeniería nuclear, ingeniería en materiales, etc.

> INVAP

INVAP S.E. (Investigación Aplicada) es una empresa estatal propiedad de CNEA (50 por ciento) y de la provincia de Río Negro (50 por ciento) dedicada al diseño y construcción de sistemas tecnológicos complejos: reactores nucleares de investigación, satélites, equipos de medicina nuclear, radares, etc.

Fue creada en 1976 y su sede está en la ciudad de Bariloche.

Sus principales actividades se centran en las áreas nuclear, espacial, defensa, tecnología industrial y energías alternativas.

Ha construido y exportado reactores nucleares de investigación y desarrollo a varios países: Perú, Argelia, Egipto y Australia. Hace poco ha ganado la licitación internacional para construir un reactor nuclear en Países Bajos.

Brasil

Brasil tiene dos reactores nucleares de potencia en operación (Angra 1 y Angra 2) y uno en construcción (Angra 3).

> Angra 1

Tipo: PWR (Pressurized Water Reactor); combustible: UO₂ con Urano enriquecido al 3.5 por ciento; refrigerante: agua liviana (H₂O); potencia: 609 MWe; ubicación: Angra do Reis (150 kilómetros al sur de Río de Janeiro); fabricante: Westinghouse (Estados Unidos); en operación desde 1982.

> Angra 2

Tipo: PWR (Pressurized Water Reactor); combustible: UO₂ con Urano enriquecido al 3.5 por ciento; refrigerante: agua liviana (H₂O); potencia: 1275 MWe; ubicación: Angra do Reis; fabricante: KWU (Siemens, Alemania); en operación desde 2000.

> Angra 3

Tipo: PWR (Pressurized Water Reactor); combustible: UO₂ con Urano enriquecido al 3.5 por ciento; refrigerante: agua liviana (H₂O); potencia: 1245 MWe; ubicación: Angra do Reis; fabricante: KWU (Siemens, Alemania); se estima que estará en operación a partir de 2025.

Brasil posee cuatro reactores nucleares de investigación de baja potencia: dos en el IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) en San Pablo, uno en el IEN (Instituto de Energía Nuclear) en Río de Janeiro, y uno en el CDTN (Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear) en Belo Horizonte.

Posee, además, un reactor de investigación y producción de radioisótopos en construcción, el RMB (Multipurpose Research Reactor), en San Pablo. Este proyecto se lleva adelante en cooperación con Argentina, en forma paralela a la construcción del reactor RA10 en Ezeiza.

Brasil, al igual que Argentina, posee un ciclo de combustible completo y autónomo para alimentar de combustible a sus reactores nucleares.

> Minería de Urano

Tiene 209000 toneladas de reservas aseguradas de Urano, y es la sexta reserva en el mundo. Tiene, también, grandes reservas de Torio (alrededor de 300000 ton), que no explota.

Produce 340 ton U/año, en los sitios de Poços de Caldas, Lagoa Real y Santa Quiteria.

> Enriquecimiento de Urano

Como parte del programa de construcción de un submarino de propulsión nuclear, la Armada brasileña instaló en 1998, en Iperó (a 100 kilómetros de San Pablo), una planta piloto de enriquecimiento de Urano por ultracentrifugación. Luego, el gobierno brasileño decidió construir una planta industrial en Resende, Río de Janeiro, usando la misma tecnología. La planta comenzó a operar en 2006. Si bien la capacidad es chica, 120 MTSWU, alcanza para enriquecer el 50 por ciento del Urano utilizado en Angra 1.

> Fabricación de elementos combustibles

La Fábrica de Combustible Nuclear (FCN) está ubicada en Resende, y comprende tres unidades: producción de UO₂, producción de pastillas (pellets) de UO₂ y fabricación de los elementos combustibles para alimentar a los reactores nucleares de potencia.

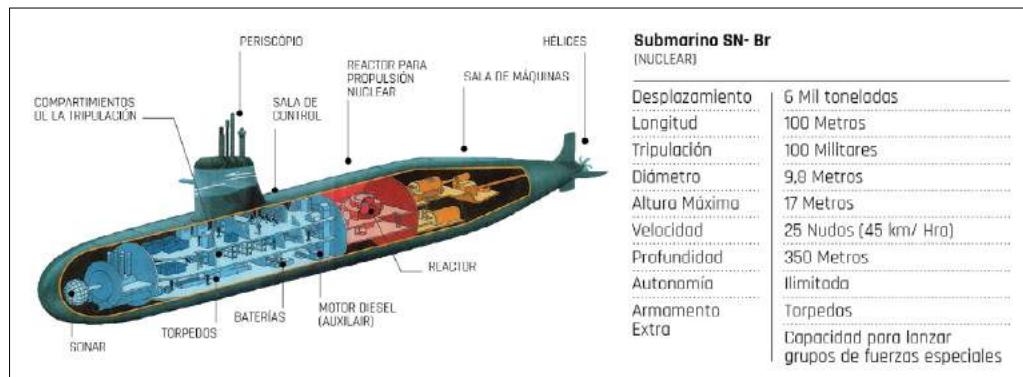
> Centros de investigación y desarrollo

Brasil posee varios centros de investigación y desarrollo nuclear: Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear (CDTN), en Belo Horizonte; Centro Regional de Ciencias Nucleares (CRCN), en Recife, Instituto de Energía Nuclear (IEN), en Río de Janeiro, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), en San Pablo; e Instituto de Radioprotección y Dosimetría (IRD), en Río de Janeiro.

> Proyecto de submarino de propulsión nuclear

La Marina brasileña lleva adelante un proyecto que prevé la construcción de un submarino de propulsión nuclear, a través de la empresa Itaguaí Construções Navais (ICN), en Itaguaí, a 70 kiló-

FIGURA - SUBMARINO BRASILEÑO CON PROPULSIÓN NUCLEAR



metros de Río de Janeiro. Esta construcción se llevará a cabo con el apoyo de Francia, a través de un acuerdo firmado en 2008.

El submarino, bautizado Álvaro Alberto en homenaje a un célebre almirante brasílico, tendrá 9.8 metros de diámetro, 100 metros de largo y un desplazamiento de 6000 toneladas. Será propulsado por un reactor compacto PWR, refrigerado por agua liviana y alimentado por Urano enriquecido al 20 por ciento.

Inicialmente, la terminación del submarino nuclear estaba prevista para 2025, pero la crisis económica que asoló el país a partir del 2014 afectó directamente al proyecto, que pasó a desarrollarse a pasos más lentos.

De esta forma, Brasil se uniría al grupo de seis países con submarinos de propulsión nuclear: Estados Unidos, Rusia, Reino Unido, Francia, China y la India.

México

México cuenta con dos reactores nucleares de potencia en operación, en la localidad de Laguna Verde, estado de Veracruz, sobre el Golfo de México.

> Laguna Verde 1

Tipo: BWR (Boiling Water Reactor); combustible: UO₂ con Urano enriquecido al 3 por ciento; refrigerante: agua liviana (H₂O); potencia: 800 MWe; fabricante: General Electric (Estados Unidos); en operación desde 1989.

> Laguna Verde 2

Tipo: BWR (Boiling Water Reactor); combustible: UO₂ con Urano enriquecido al 3 por ciento; refrigerante: agua liviana (H₂O); potencia: 800 MWe; fabricante: General Electric (Estados Unidos); en operación desde 1994.

México compra a Estados Unidos el combustible necesario para alimentar sus centrales nucleares, ya que no cuenta con instalaciones propias para fabricarlo.

Las principales instituciones nucleares de México son: el Instituto Nacional de Investigación Nuclear (ININ), Urano de México (Uramex), y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS).

Uramex ha identificado reservas por alrededor de 2000 toneladas de Urano, pero, a la fecha, no las explota.

El Instituto Nacional de Investigación Nuclear (ININ), ubicado cerca de la ciudad de México, opera un reactor nuclear de investigación desde 1968.

Chile

Chile no posee, a la fecha, instalaciones nucleares de importancia. Solamente cuenta con un reactor nuclear de investigación que opera desde 1974.

En el año 2007, el Ministerio de Energía anunció que comenzaba los estudios técnicos para instalar energía nuclear de potencia.

En el año 2010, el Ministerio anunció que el primer reactor nuclear de 1100 MWe debería estar operando en 2024, y que cuatro reactores más entrarían en operación para 2035. Para ello se diseñó un plan para crear la infraestructura necesaria que incluyera la formación de recursos humanos, el establecimiento de un marco regulatorio y previsiones para la seguridad y gestión de residuos nucleares.

En 2011, la CCHEN (Comisión Chilena de Energía Nuclear) firmó un acuerdo con la CEA (Comisión de Energía Atómica) de Francia para la cooperación institucional en energía nuclear.

En mayo de 2018, la CCHEN firmó un memorándum de entendimiento (MoU – Memorandum of Understanding) con Rosatom América Latina (Rusia) para promover la cooperación nuclear.

Ecuador

En agosto de 2009 el gobierno firmó un acuerdo de cooperación con Rosatom (Rusia) con vistas a desarrollar un programa nuclear en el país.

Venezuela

El país no cuenta con instalaciones nucleares de importancia. Solo cuenta con un reactor de investigación que fue operado entre 1960 y 1994 por el Instituto Venezolano de Investigación Científica.

Un acuerdo firmado con Rusia en 2010 prevé la construcción de dos reactores nucleares de potencia de 1200 MWe cada uno y un reactor de investigación y producción de radioisótopos, pero no se ha establecido un cronograma de tiempos claro.

Bolivia

En 2014 el gobierno creó la Comisión de Energía Atómica para llevar adelante un programa de energía nuclear y producción de radioisótopos.

En marzo de 2015 el gobierno firmó un acuerdo de cooperación con Argentina para desarrollar infraestructura e instituciones para el uso pacífico de la energía nuclear. El apoyo de Argentina incluiría el diseño, construcción y operación de reactores de investigación e instalaciones para gestión de combustible quemado.

En octubre de 2015 se firmó un acuerdo preliminar con Rusia con vistas a construir un reactor nuclear de potencia.

Perú

Perú cuenta con un reactor de investigación, el RP-10. Este reactor, de 10 MW de potencia térmica, fue diseñado y construido para el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de la Argentina, con la participación de INVAP.

El reactor, que entró en funcionamiento en 1988, está situado en el centro nuclear Oscar Miro-quesada De la Guerra, de Huarangal, Lima.

Cuba

En 1976, con apoyo de la Unión Soviética, Cuba planificó la instalación de dos reactores rusos de potencia. Se construyó parcialmente una pequeña ciudad nuclear para alojarlos, que fue inaugurada en 1982. Despues del colapso de la Unión Soviética, el proyecto fue suspendido en 1992.

En septiembre de 2016, Cuba firmó con Rosatom (Rusia) un nuevo acuerdo de cooperación en el área nuclear, que incluye medicina nuclear e investigación básica y aplicada.

Paraguay

Paraguay firmó acuerdos con Rosatom (Rusia) en 2016 y 2017, para desarrollar infraestructura nuclear en el país, incluyendo la aplicación de radioisótopos en industria, medicina y agricultura.

Está prevista, también, la construcción de un reactor de investigación.

Conclusiones

De todas las armas de destrucción masiva, podemos afirmar, sin duda, que las armas nucleares son las que tienen mayor poder devastador. Su impacto es instantáneo y contundente.

En primer lugar, su alcance es muy extenso: un artefacto de fisión de baja potencia (~ 20 kT) produce destrucción total en un radio de dos kilómetros, y daños materiales hasta los tres kilómetros. Un artefacto de fusión de 1 MT, en cambio, provoca destrucción total en un radio de 7 kilómetros, por lo que podría destruir, materialmente, nuestra Capital Federal.

En segundo lugar, sus múltiples efectos no dejan, prácticamente, posibilidad de defensa. Es muy difícil protegerse simultáneamente de la magnitud y combinación de sus efectos (onda de choque, onda térmica, y radiación). Solamente un bunker subterráneo reforzado podría ofrecer protección parcial a un número limitado de personas. La respuesta médica ante una explosión nuclear es muy difícil.

La recuperación y descontaminación de una zona atacada por un arma nuclear es sumamente costosa y puede llevar años. Piénsese, si no, en Hiroshima y Nagasaki, y más cerca en el tiempo, en Chernóbil y Fukushima.

Es prácticamente inimaginable lo que podría suceder en caso de desatarse una guerra nuclear a gran escala. Teniendo en cuenta los arsenales actuales disponibles, ninguna región de la tierra estaría libre de sus efectos. No en vano se ha acuñado el término “holocausto nuclear”.

Una de las características distintivas de las armas nucleares es que sus insumos no son de uso dual: ninguna otra actividad requiere el uso de Urano puro enriquecido al 90 por ciento o Plutonio puro. Los reactores nucleares usados para producir energía eléctrica utilizan UO₂ con Urano enriquecido al 4 por ciento o PuO₂. Tampoco ninguna otra actividad utiliza plasma de hidrógeno a millones de grados centígrados.

Las técnicas empleadas para la obtención de material físil puro (U²³⁵ o Pu), tanto el enriquecimiento de Urano como el reprocesamiento de combustible nuclear quemado, involucran procesos complejos y requieren plantas específicas que no se utilizan en ninguna otra industria.

El costo de construcción y operación de una planta nuclear de cualquier tipo (de enriquecimiento, reprocesamiento o de un reactor nuclear) y su infraestructura asociada solo puede ser afrontado por un Estado y está fuera del alcance de cualquier actor no-estatal. El costo dependerá de su capacidad, pero normalmente es de miles de millones de dólares y su construcción puede llevar, al menos, cuatro años.

Grupos terroristas de gran poder económico podrían tener acceso a escaso material físil (pocos kilogramos) por medios ilícitos (sabotaje, tráfico ilícito), o explotando fallas de seguridad de algún Estado que sea legítimo usuario. Aunque es muy improbable, si así fuera el caso, podrían llegar a construir un artefacto rudimentario (ensamble cañón) de muy baja potencia. El temor a casos de este tipo fue manifiesto después del desmembramiento de la Unión Soviética. Existía la preocupación por posibles lotes de material físil sin control, o de científicos desempleados dispuestos a vender su know-how a cualquiera. Esto dio lugar a todo un programa de Estados Unidos, con cooperación de Rusia, para establecer controles seguros sobre el material físil y para emplear científicos rusos en centros de investigación occidentales.

Los desechos producto de toda actividad nuclear son generalmente radioactivos. Deben ser tratados adecuadamente y contar con seguridad física, ya que, no solamente representan un peligro para la salud, sino que pueden ser robados y utilizados por terroristas para fabricar un artefacto rudimentario de dispersión de material radioactivo.

Con respecto a la proliferación nuclear, uno puede preguntarse si podrán agregarse países al club nuclear. Técnicamente esto es posible, pero ese estado debería desarrollar un plan en forma

clandestina, o retirarse del TNP. En cualquiera de los casos, el anuncio de ese país de que se suma al club nuclear llevaría aparejado su aislamiento diplomático y comercial de toda la comunidad internacional.

Una situación muy común es que un estado declare que domina la tecnología nuclear a nivel laboratorio, por ejemplo, para producir materiales físisles. De esta forma, el mensaje que da es aceptable: poseo la tecnología, pero no la aplico, porque soy firmante del TNP.

¿Es posible pensar en un desarme nuclear? No a corto plazo. El artículo VI del TNP continuará siendo un tema pendiente, sujeto a la mera voluntad de las potencias nucleares. En este caso, no hay presión internacional que pueda influir.

¿Se pueden esperar nuevos desarrollos tecnológicos en el tema de las armas nucleares? Sí, es posible, pero es muy difícil inferir su naturaleza dado el sumo secreto que rodea estos desarrollos.

De todas formas, la base teórica seguiría siendo la misma, y los efectos también.

Finalmente, qué tan segura es Argentina con respecto al uso de la tecnología nuclear. Vale aquí, entonces, hacer referencia a la seguridad de las instalaciones nucleares argentinas. En otras palabras, ¿es posible aquí otro Chernóbil? Como en cualquier actividad humana, el riesgo “cero” no existe. Sin embargo, se puede afirmar que nuestros reactores han sido diseñados siguiendo las más estrictas normas de seguridad empleadas en el mundo: las IAEA Nuclear Safety Standards (<https://www.iaea.org/resources/safety-standards>). El riesgo de un accidente nuclear es del orden de 1×10^{-6} /año. Es decir, tendría que haber un millón de Atuchas para que hubiera un accidente nuclear por año.

Por último, ¿puede nuestro país desentenderse de las armas nucleares? Obviamente, no. Si bien Argentina y sus vecinos son firmantes del TNP, y América Latina es una zona declarada libre de armas nucleares, mientras existan armas nucleares en el mundo debemos entender su tecnología, evaluar sus posibles efectos y saber cómo reaccionar ante un ataque nuclear, por más improbable que éste sea.

(*) Cnl (R) A OIM Dr Osvaldo Azpitarte: Coronel retirado de Artillería, promoción 107 del Colegio Militar de la Nación. Egresado de la Escuela Superior Técnica como Ingeniero Químico, en 1993. Egresado del Instituto Balseiro (CNEA), como Ingeniero Nuclear, en 1993. Doctor en Ingeniería Nuclear, por el Instituto Balseiro, en el año 2003.

