

# Conceptos Básicos de la Energía Nuclear

## El átomo

En la naturaleza el átomo más simple que hay es el hidrógeno, cuenta con un protón y un electrón. Por tanto, para explicar el resto de los átomos, ha de haber otra partícula nuclear: el neutrón. Éste es una partícula sin carga eléctrica, ligeramente más grande que el protón. Su existencia se comprobó hasta 1932. Los neutrones y protones constituyen el núcleo del átomo; los electrones giran alrededor del núcleo en órbitas bien determinadas. Se da el nombre de nucleones a los protones y neutrones en conjunto, ambos representan el 99% de la masa del átomo. Los neutrones y los protones están unidos por fuerzas nucleares muy intensas, mucho mayores que las fuerzas eléctricas que ligan los electrones al núcleo.

El número de protones que contiene el núcleo de un átomo se denomina número atómico y es igual al número de electrones orbitales. La suma del número de protones y neutrones se conoce como número de masa; este número proporciona una idea de la masa del átomo, ya que las masas de ambas partículas son aproximadamente iguales y la masa de los electrones es comparativamente despreciable debido a que el electrón es aproximadamente 1840 veces más ligero que el protón. En la naturaleza existen 272 átomos estables con distintos números de masa que dan lugar a los 103 elementos plenamente identificados.

El núcleo del átomo se describe por el número atómico [Z], que es igual al número de protones y a su vez es igual al número de electrones, y el número de masa atómica [A], es igual a la suma de neutrones y protones en un núcleo. Una forma general de describir el núcleo de un átomo en particular es indicar el símbolo del elemento con su número de masa y su número atómico, de la siguiente forma:

$$\begin{array}{l} \text{número de masa} \\ \text{número atómico} \end{array} [\text{símbolo}] = \begin{array}{c} A \\ Z \end{array} X$$

## Tamaño y carga del núcleo

El descubrimiento del núcleo del átomo se le atribuye a Rutherford gracias a su trabajo de investigación que consistía en bombardear una delgada hoja de metal con un haz de partículas alfa. La mayoría de las partículas cargadas positivamente penetraron la hoja con facilidad, como lo indicaba un destello de luz al incidir las partículas en una pantalla de sulfuro de zinc, y algunas partículas eran desviadas ligeramente, otras sorprendentemente eran desviadas con ángulos extremos, otras partículas, incluso fueron rebotadas.

Con este experimento Rutherford demostró que la mayor parte de la masa del átomo y

su carga positiva están localizadas en una pequeña región central del átomo que llamó núcleo, y los electrones se encuentran distribuidos en el espacio alrededor de las cargas positivas. Tomando como base sus cálculos se estimó el diámetro del núcleo en aproximadamente una diezmilésima parte del diámetro del átomo mismo. La carga del núcleo determina su posición en el sistema periódico. En la tabla 1 se presentan los valores de masa y carga atómica para cada partícula del átomo.

**Tabla 1. Partículas elementales del átomo.**

Partícula	Masa atómica	Carga
Electrón	$m_e = 9.10954 \times 10^{-31} \text{ Kg}$	$-1.60216 \times 10^{-19}$ coulombs
Protón	$m_p = 1.67265 \times 10^{-27} \text{ Kg}$	$+1.60216 \times 10^{-19}$ coulombs
Neutrón	$m_n = 1.67495 \times 10^{-27} \text{ Kg}$	0

## Equivalencia entre masa y energía

En 1905. Albert Einstein desarrolló la ecuación que relaciona la masa y la energía.

$$E = mc^2$$

como parte de su teoría de la relatividad especial. Dicha ecuación afirma que una masa determinada (m) está asociada con una cantidad de energía (E) igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz (c). Una cantidad muy pequeña de masa equivale a una cantidad enorme de energía.

## Unidad de masa atómica (u.m.a)

Como se aprecia en la tabla 1, las partículas atómicas tienen masas muy pequeñas, por lo cual se acostumbra expresar estas cantidades en unidades de masa atómica (u.m.a).

La u.m.a. se define como la doceava parte de la masa del átomo de carbono más abundante. En relación con el kilogramo, la u.m.a. es:

$$1 \text{ u.m.a.} = 16606 \times 10^{-27} \text{ Kg}$$

Por lo que sustituyendo en la ecuación de Einstein,  $E=mc^2$ , se puede igualar la masa con unidades de energía, por lo tanto se tiene:

$$E = (1uma)(c^2) = (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J}$$

Escrita en electrón-volts, que es la unidad más conveniente, se tiene:

$$E = (\Delta m)c^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J} \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

$$E = (\Delta m)c^2 = 9.31 \times 10^8 \text{ eV} = 931 \text{ MeV}$$

Esto quiere decir, 1 u.m.a. libera 931 MeV. Por tanto, la energía liberada (B) en la formación de un núcleo será:

$$B = \text{defecto másico} \times 931 \text{ MeV}$$

Donde el defecto másico es la diferencia entre la masa en reposo de un núcleo y la suma de las masas en reposo de los nucleones que lo forman.

## Isótopos

Los isótopos son átomos que contienen el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones. El núcleo de un isótopo se denomina núclido. Todos los núclidos de un elemento tiene el mismo número de protones, y diferentes neutrones. Para describir los isótopos se necesita una notación especial. En la parte izquierda del símbolo del elemento se escribe un índice suscrito, que representa el número atómico (Z), y un índice sobrescrito que representa su masa (A).

Ejemplo:



## Energía de enlace nuclear

Se define como la energía necesaria para separar un núcleo en los nucleones que lo forman, o bien como la energía que se libera cuando se unen los nucleones para formar el núcleo.

El origen de la energía de ligadura o de enlace nuclear reside en la desaparición de una parte de la masa de los nucleones que se combinan para formar el núcleo. Esta diferencia de masa recibe el nombre de defecto másico, y se transforma en energía.

Si a la suma de las masas de los nucleones y electrones de un átomo le restamos la masa medida experimentalmente a través del espectrógrafo de masas, obtenemos el defecto másico, y podemos calcular la energía total de enlace. La energía de enlace o de ligadura será equivalente a la energía liberada en la formación de un núcleo.

$$B = \text{defecto másico} \times 931 \text{ MeV}$$

## Desintegraciones Alfa, Beta, Gama

La radiactividad es un fenómeno que se origina exclusivamente en el núcleo de los átomos radiactivos. La causa que los origina se debe a la variación en la cantidad de partículas que se encuentran en el núcleo.

Las partículas alfa son átomos de He doblemente ionizados, es decir, que han perdido sus dos electrones. Por tanto, tienen dos neutrones y dos protones. Es la radiación característica de isótopos de número atómico elevado, tales como los del uranio, torio, radio, plutonio. Dada la elevada masa de estas partículas y a que se emiten a gran velocidad por los núcleos (su velocidad es del orden de  $10^7$  m/s), al chocar con la materia pierden gradualmente su energía ionizando los átomos y se frenan muy rápidamente, por lo que quedan detenidas con tan sólo unos centímetros de aire o unas milésimas de milímetro de agua. En su interacción con el cuerpo humano no son capaces de atravesar la piel, por lo tanto tienen poco poder de penetración, siendo absorbidos totalmente por una lámina de aluminio de 0.1 mm de espesor o una simple hoja de papel.

Las partículas beta son electrones emitidos a grandes velocidades próximas a la de la luz. Debido a la menor masa que la radiación alfa, tienen más poder de penetración que las partículas alfa siendo absorbidas por una lámina de aluminio de 0.5 mm de espesor y quedan frenadas en algunos metros de aire, o por 1cm de agua. En el cuerpo humano, pueden llegar a traspasar la piel, pero no sobrepasan el tejido subcutáneo. Los positrones (partículas beta positiva) son partículas con masa despreciable y carga equivalente a la de un protón.

Las partículas gamma son radiaciones electromagnéticas de la misma naturaleza que los rayos X pero de menor longitud de onda. Su poder de penetración es muy elevado frente al de las partículas alfa o beta, pudiendo atravesar el cuerpo humano. Quedan frenadas con espesores de 1 m de hormigón o unos pocos centímetros de plomo, por lo que cuando se utilizan fuentes radiactivas que emiten este tipo de radiación, hay que utilizar blindajes adecuados.

Los neutrones proceden de reacciones de fisión o de reacciones nucleares con otras partículas. Pueden ser muy penetrantes excepto en agua y en hormigón, y se utilizan para producir elementos radiactivos cuando interactúan con elementos estables.

La figura 1 nos muestra el poder de penetración de las diferentes radiaciones.

Los físicos Joliot-Curie demostraron que los átomos estables de un elemento pueden hacerse artificialmente radiactivos bombardeándolos adecuadamente con partículas nucleares o rayos. Estos isótopos radiactivos se producen como resultado de una reacción o transformación nuclear.

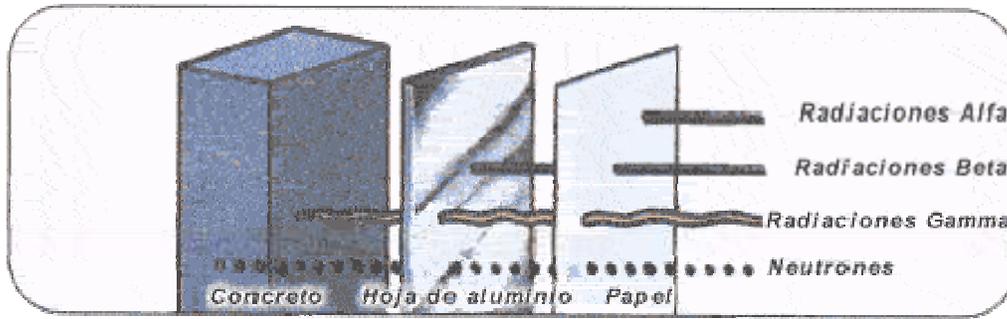


Figura 1. Radiaciones Alfa, Beta, Gama

## Reacciones nucleares

Una reacción nuclear ocurre cuando cambia el número de neutrones o protones en un núcleo. Algunas reacciones nucleares ocurren con una liberación de energía, mientras que otras ocurren sólo cuando la energía se añade al núcleo. La emisión de partículas por núcleos radiactivos es una forma de reacción nuclear. El núcleo radiactivo libera su exceso de energía en la forma de energía cinética de las partículas emitidas.

## La vida media y razón de decaimiento

La vida media de un elemento es el tiempo necesario para que decaiga la mitad del núcleo radiactivo. La vida media de un isótopo radiactivo puro es única para ese isótopo en particular. El número de desintegraciones por segundo de una sustancia radiactiva se conoce como su actividad. La actividad es proporcional al número de átomos radiactivos presentes. Por lo tanto la actividad de una muestra particular se reduce por un medio, en una vida media. Así, puesto que la radiactividad es un fenómeno nuclear, el proceso no es alterado por un cambio o la condición de la muestra. Un núclido radiactivo dado emitirá el mismo tipo de radiación a la misma velocidad haciendo caso omiso del compuesto del cual forma parte, de su temperatura, de la presión aplicada, o de la presencia de campos electroestáticos, magnéticos, o gravitacionales. Los átomos radiactivos en una muestra dada no se desintegran simultáneamente, la velocidad de emisión de las radiaciones en cualquier tiempo es proporcional al número de átomos radiactivos presentes. Puesto que este número está disminuyendo continuamente el proceso se conoce como un decaimiento radiactivo. La vida media es una propiedad útil para la identificación de varias especies de núclidos, porque cada núclido radiactivo tiene una vida media característica.

## La fisión nuclear

Las dos características fundamentales de la fisión nuclear son: en primer lugar, la energía liberada por la fisión es muy grande; la fisión de 1 Kg de uranio 235 libera 18.7 millones de kW-hora en forma de calor. En segundo lugar, el proceso de fisión iniciado

por la absorción de un neutrón en el uranio 235, libera un promedio de 2.5 neutrones en los núcleos fisionados (ver figura 2). Estos neutrones provocan rápidamente la fisión de varios núcleos más, con lo que liberan otros cuatro o más neutrones adicionales e inician una serie de fisiones nucleares auto mantenidas, una reacción en cadena que lleva a la liberación continuada de energía nuclear.

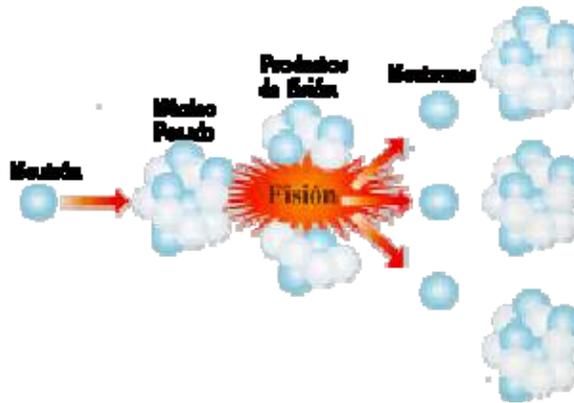


Figura 2. Fisión Nuclear

Esta reacción en cadena que se produce dentro del reactor la podemos medir por medio del factor de multiplicación  $k$ , que no es más que la razón de neutrones que se producen entre los que se consumen.

Este valor de  $k$  debe de ser de 1 para que las reacciones en cadena se produzcan de forma constante, esto es que el número de neutrones que se producen en las fisiones, es igual al número de neutrones que se consumen, cuando  $k$  es igual a 1, se dice que es crítica, si es menor o mayor a 1 se llama subcrítica o supercrítica respectivamente.

Cuando  $k$  es subcrítica no hay suficientes neutrones para mantener la reacción en cadena, por lo que la reactividad se verá mitigada, por la deficiencia de neutrones y la potencia disminuirá.

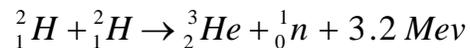
Cuando  $k$  es supercrítica habrá más neutrones producidos que los que se consumen para mantener una reacción en cadena, y por lo tanto la potencia aumentará

El uranio presente en la naturaleza sólo contiene un 0,71% de uranio 235; el resto corresponde al isótopo no fisible, uranio 238. Una masa de uranio natural, por muy grande que sea, no puede mantener una reacción en cadena porque sólo el uranio 235 es fácil de fisionar. Es muy improbable que un neutrón producido por fisión, con una energía inicial elevada de aproximadamente 1 MeV, inicie otra fisión, pero esta probabilidad puede aumentarse cientos de veces si se frena el neutrón a través de una serie de colisiones elásticas con núcleos ligeros como hidrógeno, deuterio o carbono. En ello se basa el diseño de los reactores de fisión empleados para producir energía.

Las diferencias entre la fisión y la fusión nuclear son: en la fisión nuclear, un núcleo pesado como el Uranio 235, es dividido generalmente en dos núcleos más ligeros debido a la colisión de un neutrón (recordemos que un átomo se compone de

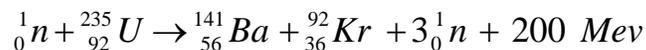
electrones, neutrones y protones). Como el neutrón no tiene carga eléctrica atraviesa fácilmente el núcleo del Uranio. Al dividirse éste, libera más neutrones que colisionan con otros átomos de Uranio creando la conocida reacción en cadena de gran poder radiactivo y energético. Esta reacción se produce a un ritmo muy acelerado en las bombas nucleares, pero es controlado para usos pacíficos. Por otra parte, la fusión nuclear ocurre cuando dos núcleos atómicos muy livianos se unen, formando un núcleo atómico más pesado con mayor estabilidad. Estas reacciones liberan energías tan elevadas que en la actualidad se estudian formas adecuadas para mantener la estabilidad y confinamiento de las reacciones.

La fusión de dos núcleos ligeros libera millones de electronvolts (MeV), como ocurre cuando dos núcleos de hidrógeno pesado o deuterones ( ${}^2_1H$ ) se combinan según la reacción



para producir un núcleo de helio 3, un neutrón libre y 3.2 MeV, o  $5.1 \times 10^{-13}$  julios (J).

También se libera energía nuclear cuando se induce la fisión de un núcleo pesado como el  ${}^{235}_{92}U$  mediante la absorción de un neutrón, como en la reacción



que produce bario 141, criptón 92, tres neutrones y 200 MeV, o  $3.2 \times 10^{-11}$  J. Una reacción de fisión nuclear libera una energía 10 millones de veces mayor que una reacción química típica.