

Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Simulaciones del transporte de arena en un sandpile.
Analogías con los procesos de transporte de partículas
en plasmas de fusión nuclear**

**Sand transport simulations in a sandpile. Analogies with
particle transport processes in nuclear fusion plasmas**

Para acceder al Título de:

**GRADO EN INGENIERÍA DE LOS
RECURSOS ENERGÉTICOS**

Autor: D. Pablo Alonso Otí

Director: D. José Ángel Mier Maza

Coordinador: D. Raúl Husillos Rodríguez



INDICE GENERAL

Índice de figuras	4
Índice de tablas	6
Agradecimientos	7
Resumen.....	8
1. Introducción	9
1.1. Miscelánea energética: pasado y presente.....	10
1.2. Los recursos naturales no renovables.....	12
1.3. La energía nuclear	14
1.3.1 La fisión nuclear, del uranio al kWh	16
1.3.2 Fusión Nuclear, una alternativa real	19
1.4. Percepción de la Energía Atómica en la sociedad española	21
2. Objeto y alcance del estudio	24
3. Estado del arte	25
3.1. Análisis teórico de la fusión nuclear.....	25
3.1.1 Qué es un plasma.....	28
3.1.2 Tipos de confinamiento.....	29
3.1.2.1. Confinamiento magnético.....	30
3.1.2.2. Confinamiento inercial	31
3.1.3 Tipos de dispositivos confinantes	32
3.1.3.1. Reactor Tokamak.....	32
3.1.3.2. Reactor Stellarator	33
3.1.4 Transporte en plasmas de fusión	34
3.1.4.1. Transporte clásico y neoclásico.....	34
3.1.4.2. Transporte Anómalo.....	35
3.1.5 Condiciones para la fusión nuclear	36
3.1.6 Proyecto ITER	37
3.2. Estudio científico relativo a la fusión nuclear	39
4. Metodología	42
4.1. Criticalidad Auto-Organizada	42
4.2. Principio del sandpile como autómata celular.....	43
4.3. Sandpile difusivo	45
5. Descripción de los datos del estudio.....	46
5.1. Comparativa entre los perfiles de densidad analíticos y numéricos	46



5.2	Estudio de los flujos radiales de partículas	49
5.3	Estudio de las trayectorias y tiempos de confinamiento de partículas trazadoras en el sandpile	50
6.	Conclusiones.....	54
7.	Apéndice 1.....	56
8.	Bibliografía	57
8.1.	Bibliografía	57
8.2.	Webgrafía.....	57
8.3.	Otros documentos de interés	58



Índice de figuras

Figura 1- Sol, estrella gigante de nuestro universo como ejemplo de reactor termonuclear. Fuente: https://nasasearch.nasa.gov/search/images?utf8=%E2%9C%93&affiliate=nasa&query=sun	9
Figura 2- Evolución de la demanda anual española (GWh). Fuente: REE	10
Figura 3- Cobertura anual de la demanda anual de energía eléctrica española (MWh). Fuente: REE.....	11
Figura 4-Período de semidesintegración. Fuente: Instituto preuniversitario de Chile	13
Figura 5- Representación de los distintos elementos químicos según Dalton. Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México	14
Figura 6- Diferencias entre los modelos de Thomson y Rutherford. Fuente: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica	15
Figura 7- Reacción en cadena después de una fisión nuclear. Fuente: Comisión Nacional de Energía Atómica Argentina	16
Figura 8- Proceso de enriquecimiento del uranio. Fuente: Sociedad Nuclear Europea	18
Figura 9- Reacción de fusión. Fuente: https://sputnik87.wordpress.com/	19
Figura 10- Reactor de fusión Tokamak. Fuente: https://sputnik87.wordpress.com/tag/reactor-tokamak/	20
Figura 11- Reactor de fusión Stellarator Wendelstein 7-X. Fuente: http://www.scientia.ro	20
Figura 12- Haces de láser. Fuente: https://ccmrecursosnaturals.wordpress.com/alternativas-alternativas/	21
Figura 13- Manifestación antinuclear. Fuente: http://kronologia.blogspot.com.es/2011_05_01_archive.html	22
Figura 14- Reactor número 4 después de la explosión sin la tapa de hormigón. Fuente: http://www.actuallynotes.com/Chernobil-metafora-del-final-de-la-URSS.html/	23
Figura 15- Energía de enlace por nucleón en función del número másico. Fuente: http://forum.lawebdefisica.com	26
Figura 16- Sección eficaz para reacciones de fusión, en función de la energía cinética que tienen los dos núcleos antes de la reacción. Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx	27
Figura 17- Función de distribución de Maxwell para los átomos (o moléculas) de gas en equilibrio térmico. Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/sec_5.htm	28
Figura 18- Tasa de reacción σ para las principales reacciones de fusión, como la temperatura del gas. Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/sec_5.htm	29
Figura 19- Partículas desplazándose alrededor de las líneas de campo magnético helicoidalmente frente a partículas moviéndose sin líneas de campo magnético. Fuente: http://www.scienceinschool.org/2012/issue22/fusion	30
Figura 20- Pasos en la ignición de un pellet de combustible con breve explicación. Fuente: http://francis.naukas.com/	31
Figura 21- Generación del campo magnético en un reactor Tokamak. Fuente: http://ffden-2.phys.uaf.edu/103_fall2003.web.dir/tim_chrisman/what%20is%20fusion.htm	32



Figura 22- Geometría compleja del reactor Stellarator. Fuente: <http://fusion4freedom.us/> 33

Figura 23- Instalaciones del ITER en Cadarache, Francia.
Fuente: <https://www.taringa.net/posts/imagenes/19012207/Reactor-Internacional-de-Fusion-ITER-Francia.html> 37

Figura 24- Primera búsqueda realizada con Scopus. 39

Figura 25- Cantidad de artículos por año usando el cuarto criterio de búsqueda. 40

Figura 26- Criticalidad auto-organizada en una pila de arena.
Fuente: https://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=PMC4171833_fnsys-08-00166-g0002&req=4..... 43

Figura 27- Ejemplo de un autómata celular simple y unidimensional.
Fuente: <http://www.microsiervos.com/images/cellular-automata.png> 43

Figura 28-- Normas que regulan la dinámica del sandpile. Fuente:
Elaboración propia 44

Figura 29- Esquema con los posibles valores para la altura h de las cuatro últimas celdas del sandpile (caso $D0/P0 = 0$). h_u , h_a y h_l son los valores máximo, medio y mínimo para la altura de la celda respectivamente. $hx = L = 0$ es la condición de contorno para la última celda.
Fuente: Physical Review E, 94 022128 (2016)..... 47

Figura 30— Perfiles de densidad en estado estacionario para dos casos con diferente valor de la razón de difusión $D0/P0$. En uno (azul), no existe difusión, por lo que el perfil es una línea recta. En otro (rojo), sí hay difusión, por lo que aparece un punto de transición (para este caso particular resulta $xt = 154$). En ambos casos, se han superpuesto los resultados analíticos (líneas continuas) junto con los obtenidos del autómata celular (puntos). 48

Figura 31— Registros temporales de $\Gamma(x, t)$ en dos zonas a la derecha (a) y a la izquierda (b) del punto de transición xt . Los insets incluidos son zooms de las zonas sombreadas en las gráficas principales..... 49

Figura 32— Movimiento a través del sandpile de 3 partículas trazadoras, con posiciones iniciales elegidas de forma aleatoria dentro del 10% de las celdas más internas. Los segmentos verticales se corresponden con periodos en los que la partícula permanece en reposo en una celda. Los segmentos (casi) horizontales se corresponden con periodos en los que la partícula es transportada radialmente, a través de avalanchas. 52

Figura 33— Dependencia del tiempo de confinamiento de las partículas trazadoras, τ_c , con $P0$. Los parámetros de las simulaciones fueron $L = 400$, pendiente crítica $Z_c = 20$, tamaño de volcado $N_f = 4$ 53



Índice de tablas

Tabla 1- Criterio de Lawson y parámetros involucrados. Fuente: elaboración propia	36
Tabla 2- Dimensiones y características principales del ITER. Fuente: http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/iter/iter02.htm	38



Agradecimientos

En el ámbito educativo, me gustaría agradecer su predisposición, tiempo empleado en ello y su esfuerzo tanto a D. José Ángel Mier Maza como a D. Raúl Husillos Rodríguez para la realización de este TFG. Sin ellos, no hubiera sido posible.

En el ámbito personal, agradecer a mis padres por brindarme la oportunidad de poder estudiar una carrera universitaria.



Resumen

Por todos es bien sabido que las fuentes de energía tradicionales están próximas a su extinción debido a que usan combustibles fósiles y otros elementos como el uranio que no son renovables al ritmo que se consumen o se extraen. Es por ello que el número de investigaciones en torno a nuevos combustibles y energías alternativas durante los últimos años se ha disparado llegando a evolucionar hasta conceptos tan innovadores que en el pasado eran impensables.

En la actualidad, existen muchos tipos de energías renovables, las cuales están en uso y otras siguen en desarrollo. A pesar de ello, uno de los mayores problemas es que, a excepción de la energía hidráulica, ninguna otra energía alternativa es capaz de generar lo que se conoce como generación base, pilar fundamental de la red eléctrica de cualquier país. Así, la energía de fusión nuclear se plantea como un sustituto ideal a las centrales de energía que utilizan fuentes de energía no renovables.

Pese a que promete ser una alternativa real, de momento está en vías de desarrollo y existen aspectos que aún deben ser entendidos. Por ello, en este TFG se analizará y se tratará de arrojar más luz sobre cuestiones básicas que tienen que ver con la física subyacente relacionada con los procesos en los que se funden núcleos de átomos ligeros dando como resultado otros más pesados. Concretamente, se estudiarán los procesos de transporte de energía y partículas en plasmas de fusión nuclear.

En el presente trabajo se han realizado una serie de simulaciones, utilizando autómatas celulares, con el objetivo de reproducir la dinámica del transporte de arena en un sandpile. Se han estudiado los dos mecanismos básicos que generan transporte en el sandpile (difusión y avalanchas) y los efectos que tienen cada uno de ellos sobre los perfiles de densidad y/o sobre los flujos de partículas, así como sobre el tiempo de confinamiento de las partículas, factor este último clave a la hora de obtener energía de fusión en plasmas de fusión reales.

Palabras clave: **“fusión nuclear”, “sandpile”, “transporte”, “plasmas”, “criticalidad auto-organizada”, “difusión”, “turbulencia”, “avalanchas”**.



1. Introducción

En la época actual, la producción energética evoluciona al compás de los requerimientos de la sociedad en materia energética. Es indiscutible que a lo largo de los años la sociedad mundial ha ido avanzando tecnológicamente y científicamente, creando una necesidad de suministro energético que aumenta proporcionalmente a dicho avance. En un lapso no muy grande se ha demostrado que el actual sistema energético carece de expectativas de futuro lejanas y expirará debido a que se basa en la generación de energía mediante fuentes no renovables tales como el petróleo, el carbón, el gas o el uranio. En consecuencia, a medida que dichos recursos energéticos se vayan consumiendo, surgirá la inminente necesidad de dar el cambio a otro sistema de producción energética. Este sistema deberá considerar el cuidado por el medio ambiente, ya que el actual es altamente nocivo e insostenible, debido, principalmente, a las grandes cantidades de contaminantes (mayoritariamente gases de efecto invernadero como el CO₂) que se emiten a la atmósfera. De esta forma, se deberá aunar un sistema equilibrado combinando centrales de producción energética en sus distintas variantes (base, en punta, en media punta, etc.) Inicialmente, se deben desarrollar aún más las tecnologías de fuentes renovables existentes para posteriormente sustituir a cada una de las actuales no renovables.

De este modo, se sabe de la existencia de una tecnología aún en fase de experimentación que podrá acabar con la dependencia de los combustibles fósiles. Se trata de la fusión nuclear, que es una reacción que implica la conjunción de dos o más núcleos de átomos ligeros, dando lugar a otros más pesados. Este tipo de reacciones se dan en el sol, que no es más que un gigantesco reactor de fusión termonuclear.

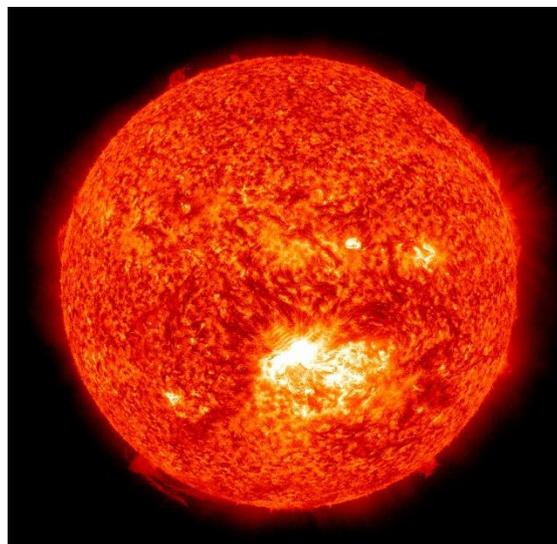


Figura 1- Sol, estrella gigante de nuestro universo como ejemplo de reactor termonuclear.
Fuente: <https://nasasearch.nasa.gov/search/images?utf8=%E2%9C%93&affiliate=nasa&query=sun>

Cabe señalar que este sistema de producción energética tiene miles de millones de años de antigüedad y sigue funcionando al ser una fuente de energía renovable.



1.1. Miscelánea energética: pasado y presente

Se conoce por miscelánea o mix energético a la combinación de los diferentes tipos de tecnología que se usan para generar energía independientemente del tipo de fuente que usen, ya sea renovable o no, para abastecer las necesidades eléctricas que una circunscripción (generalmente un país) demande.

En la cuestión que nos acontece, se realizará un breve análisis de la evolución del sistema energético español, analizando también su estado actual.

El sistema energético español de hace 30 años difiere en gran cantidad con el actual, sobre todo en términos de dispendio, pasando de los 118 TWh hasta los actuales 250 TWh, teniendo altibajos en los últimos años debido a la coyuntura económica, así como en la punta de demanda de 21.613 MW alcanzada el 2 de diciembre de 1987 hasta el récord histórico de 45.450 MW obtenido el 17 de diciembre de 2007. Ambos, consumo y punta de demanda, son indicadores clave a la hora de establecer el tamaño del sistema energético de cualquier país. Cabe destacar que de haber seguido un crecimiento lineal, estos valores serían más elevados, pero la crisis económica ha hecho disminuir la demanda de electricidad, estancando su récord en el año 2007, retardando así la problemática de la emisión de CO₂ y GEI¹.

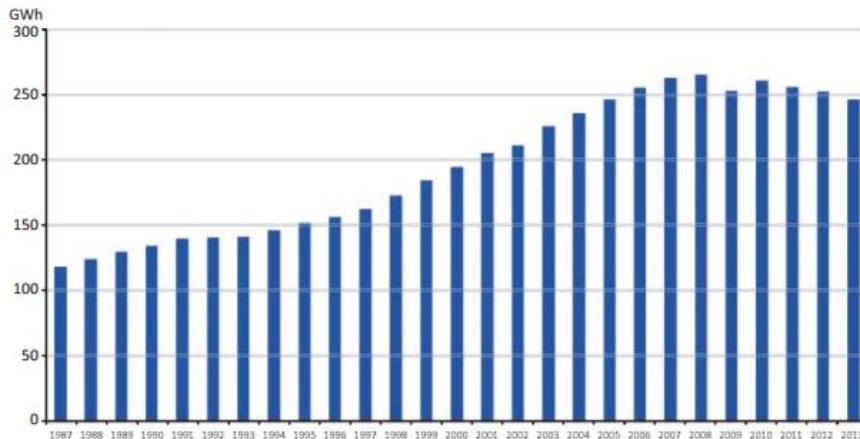


Figura 2- Evolución de la demanda anual española (GWh). Fuente: REE

Al analizar el mix de tecnologías usadas a lo largo de los años para generar electricidad se aprecia un gran cambio sufrido en el sistema eléctrico español. Esto se ha sucedido entre tiempos de crisis y legislaciones cambiantes, debido a las transiciones entre distintos gobiernos, lo que ha generado cierta inestabilidad, política y energética.

¹ Gases de efecto invernadero

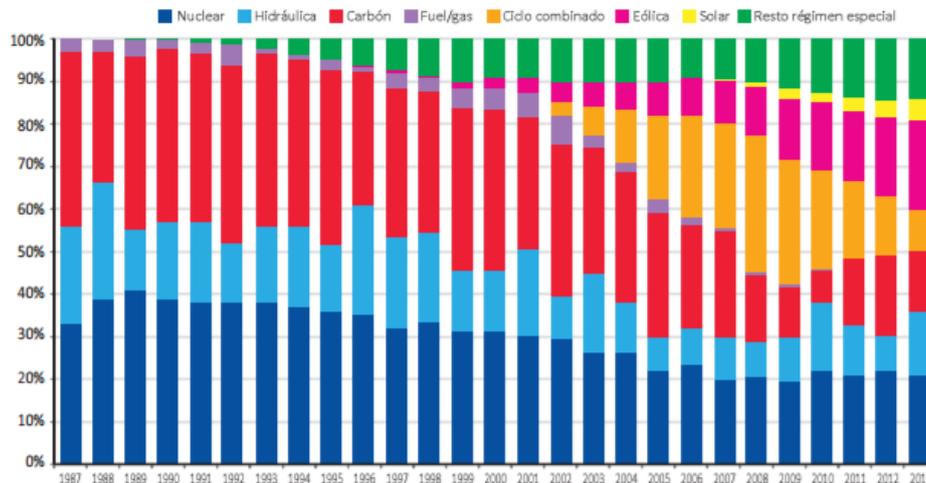


Figura 3- Cobertura anual de la demanda anual de energía eléctrica española (MWh). Fuente: REE.

En la figura 3, pese a que la mayoría de tecnologías poseen altibajos, es posible apreciar un decrecimiento de la generación eléctrica mediante el uso de carbón y fuel/gas (la última central de este tipo se cerró a finales de 2016), así como un estancamiento de la nuclear debido a una normativa (la moratoria nuclear²) que pese a ello el último año aportó el 22% de la generación total en España, siendo la primera tecnología.

Destacar un aumento del ciclo combinado pese a su último descenso debido a las fluctuaciones del precio del gas que hubo en los últimos años y la hibernación³ de dichos ciclos y un aumento mayoritario de todas las energías de carácter renovable, las cuales no son constantes de un año a otro, causado esto por las condiciones climáticas y atmosféricas. A pesar de ello, se observa un crecimiento evolutivo durante la última veintena de años obteniendo un papel más importante dentro del sistema energético español, principalmente debido a que hace 20 años estas tecnologías eran inexistentes.

Esta nueva configuración del sistema eléctrico repercute en una menor emisión de gases contaminantes, ya que una parte mayor de la demanda se cubre con tecnologías limpias, además de una reducción del hueco térmico⁴.

También destacar el gran aumento de los kilómetros del circuito eléctrico español pasando de uno de 26.000 km en 1987 hasta sobrepasar los 43.000 km al cierre del año pasado.

² La Moratoria Nuclear fue un apartado del Plan Nacional Español de 1983 (PEN-83) aprobada bajo el mandato del presidente socialista Felipe González en 1984 el cual suspendía temporalmente la construcción y puesta en marcha de centrales nucleares, supuso el bloqueo de 5 de los 7 proyectos existentes en el momento, lo que repercutió en un canon en la factura eléctrica entre 1996 y 2015 para compensar las pérdidas a las grandes compañías eléctricas.

³ Cierre temporal de una planta que permite su vuelta a la operatividad en un momento posterior. Estas resoluciones se plantean suelen cuando las centrales consideran que las situaciones de mercado actual no permiten ni siquiera la recuperación de los costes fijos de explotación o costes evitables de estar disponibles

⁴ Período de horas en las que se genera energía eléctrica con tecnologías térmicas.



Sin embargo, España aún dispone de una asignatura pendiente, ya que, pese a haber aumentado su circuito eléctrico permanece siendo una isla energética, al poseer escasas interconexiones con Europa a salvedad de Portugal y Francia, aunque también las posea con Marruecos, lo que resulta en una capacidad de interconexión de 5% de la capacidad instala, impidiendo así de gran manera exportar electricidad en momentos de baja demanda y gran generación, así como importar en el caso contrario, alta demanda y baja generación, quedando aislada en momentos críticos, llevando incluso a veces a realizar cortes en el suministro.

1.2. Los recursos naturales no renovables

Se conoce por recursos naturales a todos aquellos bienes materiales y servicios que provienen de la naturaleza sin variaciones por parte del hombre. Dentro de estos recursos existen los renovables y los no renovables. En este punto nos centraremos en los de carácter no renovable, tales como el carbón, el petróleo, el gas y los metales (mayoritariamente en lo que acontece el uranio) que son los que tienen una fecha límite ya que se agotan y se usan de forma desmesurada. Si bien, a pesar de tener el denominador común del agotamiento, poseen características distintas.

A pesar de que existen discrepancias entre las estimaciones de diferentes expertos en torno a las reservas de estas fuentes teniendo en cuenta que se encuentren nuevos yacimientos y que el ritmo de utilización sea el actual, todos apuntan a que para el año 2100 estarán agotadas.

Pese a que cada vez las fuentes de energía renovables están más presentes en nuestro entorno, cabe destacar que no solo en España, sino que mundialmente aún se posee una abundante dependencia de fuentes no renovables, el suministro de energía mundial está basado en recursos que provienen ampliamente (en torno al 80%) de combustibles fósiles: petróleo, carbón y gas natural. Esto, aparte de agotar más rápidamente las reservas contribuye a una mayor emisión de gases contaminantes tales como:

- CO_2 , más conocido como dióxido de carbono, es el principal gas de efecto invernadero, siendo responsable de más del 60% del efecto invernadero de todo el planeta. En la actualidad se emiten en torno a 25.000 millones de toneladas de CO_2 . Permanece en la atmosfera entre 50 y 200 años.
- CH_4 (metano), el segundo gas más importante de efecto invernadero. Proviene de la quema de combustibles fósiles y de la minería. En la atmósfera el metano retiene el calor y es 23 veces más efectivo que el CO_2 , pero es menos duradero, en torno a 10 o 15 años.
- N_2O u óxido nitroso, otro gas principal de efecto invernadero, contribuyendo en torno a un 4 y un 6% dicho efecto. Es unas 310 veces más efectivo que el CO_2 absorbiendo calor.

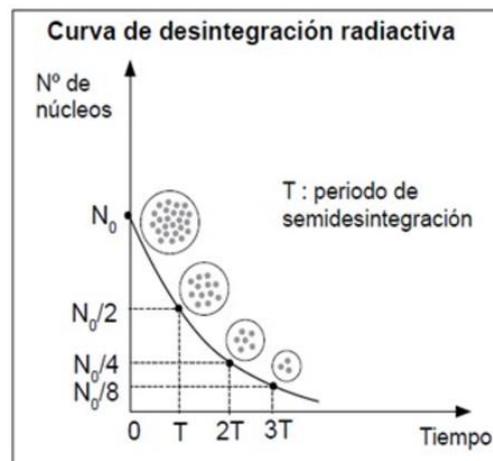
- H₂O o vapor de agua que forma nubes, atrapando así el calor que se encuentra debajo de ellas por lo que la temperatura del aire que se encuentra en esa zona aumenta.

Señalar que solo este último gas es emitido por las centrales nucleares de fisión, no obstante, generan residuos radiactivos que deben ser o bien almacenados en Almacenes Temporales Centralizados (ATC), recuperables para un reproceso o Almacén Geológico Profundo (AGP), que es un almacenamiento definitivo, o usados para un proceso de reciclaje donde el combustible puede volver a ser usado después de recibir un tratamiento.

El problema reside en que los residuos almacenados se van desintegrando lentamente a la vez que emiten radiación y aunque estén aislados y no salgan al exterior siempre existe un riesgo geológico debido a posibles tsunamis, terremotos que podrían deteriorar su aislamiento conllevando a un problema medioambiental tanto para la vida humana como para la vida animal, por lo que el emplazamiento para su almacenaje debe ser escogido con abundante cautela.

Es el tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los núcleos presentes en una muestra de un material radiactivo.

Ejemplo: el Uranio 238 tiene un periodo de semidesintegración de 4.500 millones de años.



El periodo de semidesintegración varía para las distintas sustancias radiactivas. Sin embargo, cualquier sustancia radiactiva evoluciona en el tiempo ajustándose a una curva como la que se muestra en la figura.

Figura 4-Período de semidesintegración.
Fuente: Instituto preuniversitario de Chile

Como se puede apreciar en la figura 4, el periodo de semidesintegración disminuye exponencialmente con el tiempo. Aun así, en el caso del uranio este periodo es de millones de años. Para el caso del combustible nuclear formado habitualmente por el isótopo-235 (isótopo fisil) tiene un periodo de semidesintegración de 713 millones de años.

Debido a los problemas relacionados con los gases contaminantes y a los residuos radiactivos asociados a las centrales convencionales (térmicas y nucleares) y a la escala de tiempo para su completa eliminación, mucho mayor que la escala típica de vida humana, es ineludible el desarrollo de tecnologías que sean más respetuosas con el medio ambiente, y que por consiguiente no representen una seria amenaza para la humanidad.

Se hace por tanto necesaria la implementación de las tecnologías adecuadas para evitar todos los problemas antes mencionados, o al menos reducirlos, hasta conseguir la transición a energías limpias e inagotables.

1.3. La energía nuclear

En este punto se abordará el descubrimiento del átomo, así como del modelo atómico actual y los dos tipos de energía nuclear⁵, la fisión y la fusión.

Pese a que el descubrimiento del átomo no fue para nada vertiginoso y el modelo atómico es muy moderno (inicios del siglo XX) las primeras especulaciones se remontan a la antigua Grecia cuando Demócrito (450 años antes de Cristo) fue el primer filósofo y primera persona en afirmar que la materia estaba formada por átomos, siendo ellos indivisibles: “toda la materia está compuesta por partículas sólidas, indivisibles e invisibles al ojo humano, llamadas átomos”. Pero todo ello quedó en especulaciones ya que, obviamente, nunca hubo prueba experimental alguna que demostrara esta teoría.

No fue hasta 1803 cuando Dalton presentó su teoría atómica sobre la materia, la cual demostró con múltiples experimentos, afirmando así la teoría de Demócrito y en la cual calculó los pesos atómicos de los diferentes elementos, que derivó en lo que hoy se conoce como la tabla periódica de los elementos.

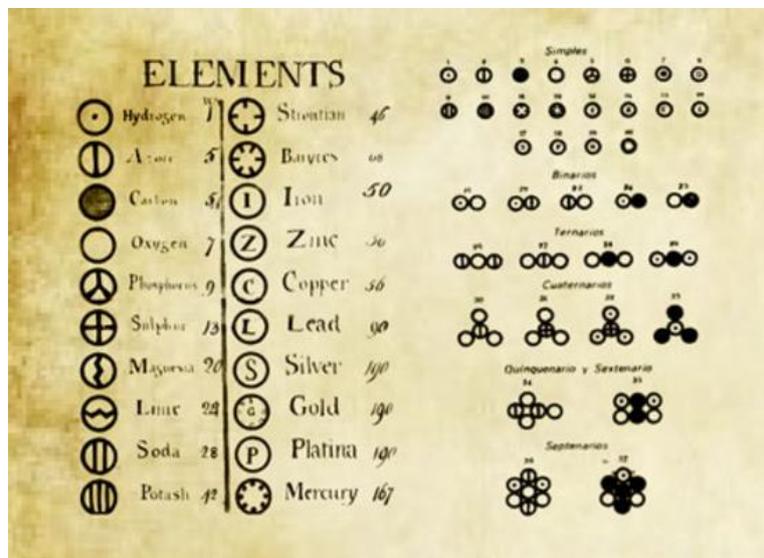


Figura 5- Representación de los distintos elementos químicos según Dalton.
 Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México

Pero 100 años más tarde se demostró que el átomo si era divisible y que este estaba formando por partículas más pequeñas. Thomson descubrió los electrones, que poseían carga negativa, para que más tarde en 1911 Rutherford señalara que dichos electrones

⁵ La energía nuclear es la energía contenida en el núcleo de un átomo, dicha energía es lo que mantiene unidos a los nucleones: protones y neutrones.

giraban alrededor del núcleo. Sin embargo, dos años después Bohr dijo que “los electrones giran alrededor del núcleo en órbitas y las demás partículas se concentraban en el núcleo del átomo”.

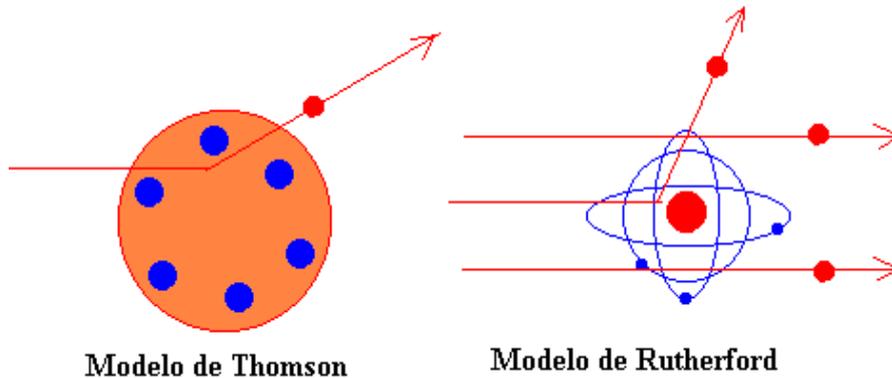


Figura 6- Diferencias entre los modelos de Thomson y Rutherford.
Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica>

Más tarde Rutherford señaló que el átomo estaba compuesto de protones que además poseían carga positiva. Unos años después, en 1932 Chadwick descubrió el neutrón, una partícula fundamental que estaba contenida en el núcleo.

Entre todos estos descubrimientos y postulaciones acerca del modelo atómico, Henri Becquerel descubrió por casualidad que un mineral que contenía uranio emitía una radiación muy potente (que más tarde sería llamada radiactividad⁶) mientras estudiaba fenómenos de fluorescencia y fosforescencia. El matrimonio Curie empezó a estudiar dicho fenómeno y se encontraron con que aparte del uranio, el torio, el radio y el polonio también emitían radiación. Demostraron que dicha radiación era una propiedad elemental del átomo. Todo ello los llevó junto con Becquerel a recibir el premio Nobel de física en 1903.

Más adelante, Irene Curie (hija mayor del matrimonio Curie) siguió investigando el trabajo realizado por sus padres junto con su marido Frédéric Joliot hasta llegar al descubrimiento de la radiación artificial al bombardear una lámina de aluminio con una partícula alfa (núcleo de Helio-4), siendo galardonados por ello con el premio Nobel de Química en 1935.

⁶ Se conoce por radiactividad al proceso por el cual se desintegran núcleos inestables liberando energía. La consecuencia es que un átomo se convierte en otro al variar el número de protones en su núcleo.

Gracias a este último descubrimiento y estudios posteriores junto con proyectos de gran envergadura (mayoritariamente militares), uno de ellos el proyecto Manhattan⁷, se llevó a cabo la realización de la primera bomba atómica que fue lanzada en Hiroshima y la segunda en Nagasaki en 1945 culminando así la segunda guerra mundial.

1.3.1 La fisión nuclear, del uranio al kWh

La fisión nuclear es el proceso por el cual un núcleo de un elemento pesado se divide en dos o más núcleos más ligeros, que son los productos de la fisión. Generalmente esto se consigue bombardeando el núcleo atómico con neutrones. En este proceso se pueden emitir más neutrones, radiación alfa, beta y gamma, junto con grandes cantidades de energía. La fisión fue descubierta en 1938 por los investigadores alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann.

Los neutrones emitidos, generalmente del orden de 2 o 3, pueden generar más fisiones al interactuar con nuevos núcleos fisionables que emitirán nuevos neutrones y así sucesivamente, generándose lo que se conoce como una “reacción en cadena”.

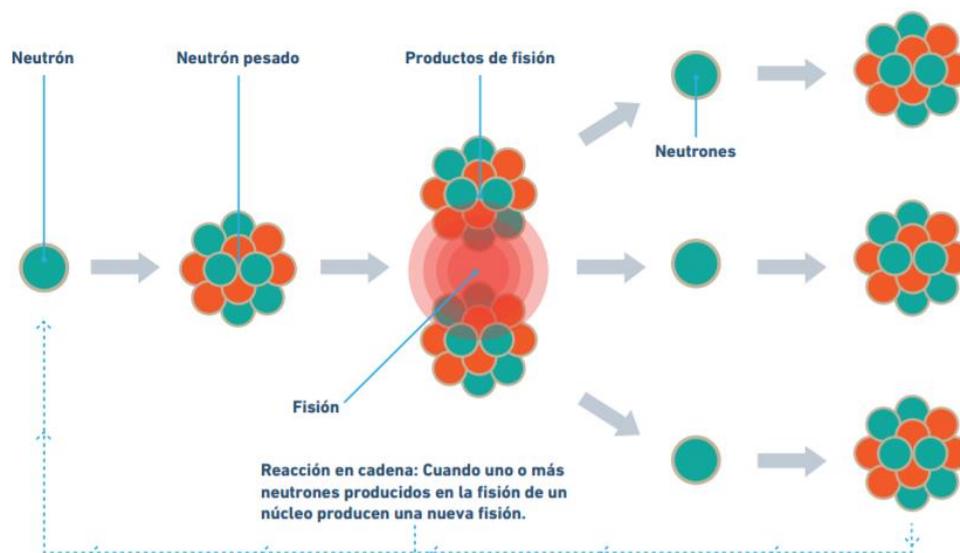


Figura 7- Reacción en cadena después de una fisión nuclear.
Fuente: Comisión Nacional de Energía Atómica Argentina

Para que esta reacción en cadena no se detenga, se requiere una cantidad de masa mínima, denominada masa crítica, que es la cantidad mínima de material que se necesita para que la reacción en cadena no se detenga sin aporte externo de neutrones.

⁷ El proyecto Manhattan, de 2 billones de dólares, fue desarrollado por E.E.U.U. durante la segunda guerra mundial con el fin de crear una bomba atómica de fisión nuclear. Fue iniciado al recibir una carta el presidente Roosevelt escrita por Albert Einstein como advertencia de que los Nazis estaban desarrollando también dicha tecnología. Pese a que E.E.U.U. fueron los primeros en controlar dicha tecnología, los rusos también llevaron a cabo proyectos similares.



La energía liberada en la reacción proviene del defecto másico que genera la fisión. En lo que nos concierne, dicho defecto es la resta entre la masa del núcleo del átomo sin reaccionar, es decir, previo a la fisión y la suma de los productos resultantes. Esta energía se puede calcular gracias a la ecuación de Einstein, $E=mc^2$, donde m sería la masa proveniente del defecto másico y c la velocidad de la luz, $3 \cdot 10^8$ m/s. Pese a que dicha masa es muy pequeña al ser la otra cantidad tan grande e ir elevada al cuadrado, genera una cantidad de energía de un altísimo valor. A pesar de ello gran parte de esta energía se manifiesta en forma de rayos gamma, que son fotones muy enérgicos pero que no poseen masa, por lo que prácticamente no interaccionan con la materia, así que la restante energía se aprovecha debido a que las partículas alfa y beta si poseen masa, por lo que poseen energía cinética. Esta energía se recoge debido a que en un reactor existen medios materiales con los que chocan y se frenan generando así un calor que será absorbido y utilizado para crear vapor y producir energía eléctrica. El principio por el cual se obtiene energía es el mismo que el que se usa en una central térmica de carbón o fuelóleo salvo que en este caso se usa uranio como combustible.

Después de varias investigaciones y experimentos se llegó a la conclusión de que el mejor combustible nuclear era el uranio, en especial el isótopo 235 del uranio ya que es un isótopo fisible, es decir, puede ser fisionado por neutrones lentos o térmicos⁸. Esto resulta muy útil en los reactores nucleares ya que dichos neutrones tienen mayor probabilidad de fisionar otros átomos de uranio, al poseer mayor sección eficaz.

Pero existe un inconveniente con el uranio 235 y es que su concentración en el mineral de uranio es del 0.7%, una concentración muy baja para que se pueda realizar la reacción nuclear de fisión. Para ello se debe enriquecer el uranio, proceso que consta de varios procesos que se pueden ver en la figura adjunta.

⁸ Neutrón lento o térmico es un neutrón que está en equilibrio térmico con el medio por el que se mueve, debido a que su velocidad y consecuentemente su energía cinética se han reducido al haberse producido choques de dispersión elástica.

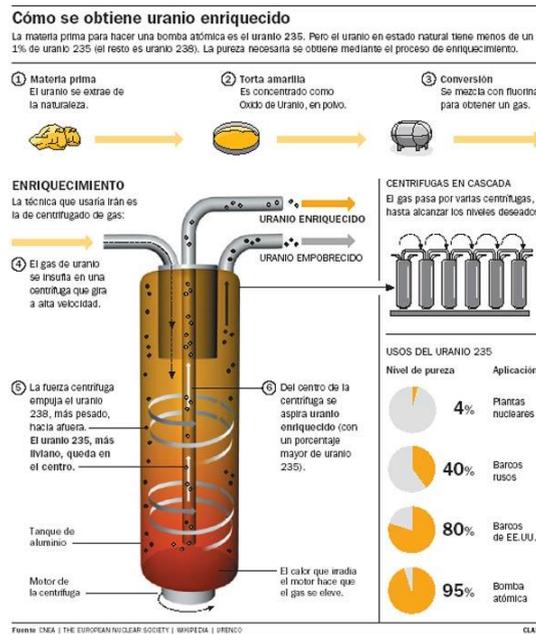


Figura 8- Proceso de enriquecimiento del uranio. Fuente: Sociedad Nuclear Europea

Visto que ya se ha obtenido el combustible nuclear en forma de pastillas de uranio, se introduce en las barras de combustible que están situadas en el interior de la vasija del reactor. Dichos reactores y su funcionamiento difieren en función de la tecnología que empleen, básicamente en función del moderador⁹ que usen y donde se genera el vapor, dentro o fuera del reactor, pero siempre siguen el mismo principio para la obtención de energía, fisiónar átomos de uranio para obtener energía en forma de calor y así poder turbinar vapor generando energía eléctrica.

En España todas las centrales nucleares usan agua ligera como moderador y son de los dos tipos de reactores más comunes:

- BWR, que son reactores de agua en ebullición, donde el agua fluye libremente por el reactor y se vaporiza para después turbinar, posteriormente a ello se enfría en un intercambiador y regresa al interior de la vasija.
- PWR, reactores de agua presurizada, aquí el agua no bulle dentro de la vasija, pero si se eleva a altas temperaturas para posteriormente intercambiar calor con el circuito de generación de vapor y así poder turbinarlo. Es el tipo de reactor más usado en España (6 de los 8 reactores existentes) y el más extendido a lo largo del mundo.

⁹ Elemento usado para frenar a los neutrones aumentando la probabilidad de que se produzcan reacciones de fisión.

1.3.2 Fusión Nuclear, una alternativa real

Por fusión se conoce a la reacción nuclear en la que dos átomos ligeros se unen para formar uno pesado, generalmente estos átomos son de hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio). Esta reacción emite partículas, así como energía en forma de rayos gamma y energía cinética de las partículas emitidas. Para que esta reacción tenga lugar es necesario una temperatura muy alta (del orden de millones de grados) ya que los reactivos deben estar en estado de plasma¹⁰.

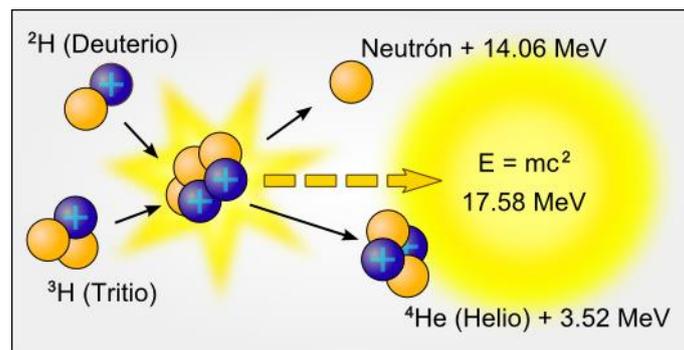


Figura 9- Reacción de fusión. Fuente: <https://sputnik87.wordpress.com/>

Como ya se comentó anteriormente, la fusión nuclear es un proceso muy común en el universo, ya que es la reacción que se produce en las estrellas. Pese a ello, para que surja efecto en la Tierra se deben de dar una serie de condiciones que aún no se controlan hasta el punto de que pueda ser tomada como una fuente de energía convencional.

Para llegar a estas condiciones se requiere de reactores nucleares de fisión que se clasifican según su modo de confinamiento:

- Confinamiento magnético, se obtiene creando un campo magnético toroidal de muy elevada intensidad generado por bobinas de campo que usan una corriente muy fuerte, evitando así que el plasma toque las paredes y pierda temperatura, factor crucial para conseguir la reacción de fusión. El método de calentamiento del plasma es el de calentamiento óhmico, para el cuál se usan corrientes eléctricas para crear un campo electromagnético; aumentando la velocidad con que se desplazan las partículas, generando un aumento de temperatura. En este caso el plasma está formado por deuterio y tritio, inicialmente en estado gaseoso.

Dentro de este tipo de confinamiento podemos encontrar varios tipos de reactores, aunque los más comunes son:

- o Tokamak, reactor de diseño ruso creado en la década de los 50. Posee una cámara de vacío de forma toroidal, además cuenta con tres grupos de bobinas. Las bobinas toroidales, que están situadas como anillos alrededor del toroide confinando y estabilizando el plasma, las bobinas poloidales

¹⁰ Se conoce por plasma al 4 estado de la materia, es un fluido formado por electrones, e iones positivos. Esto hace que el plasma sea conductor eléctrico y que responda fuertemente a los campos electromagnéticos

que son seis situadas en forma de anillos paralelos a la cámara de vacío y el solenoide central, emplazado como un dedo dentro del donut, es el grupo más importante ya que es el encargado de inducir corriente al plasma. Es de funcionamiento pulsado.

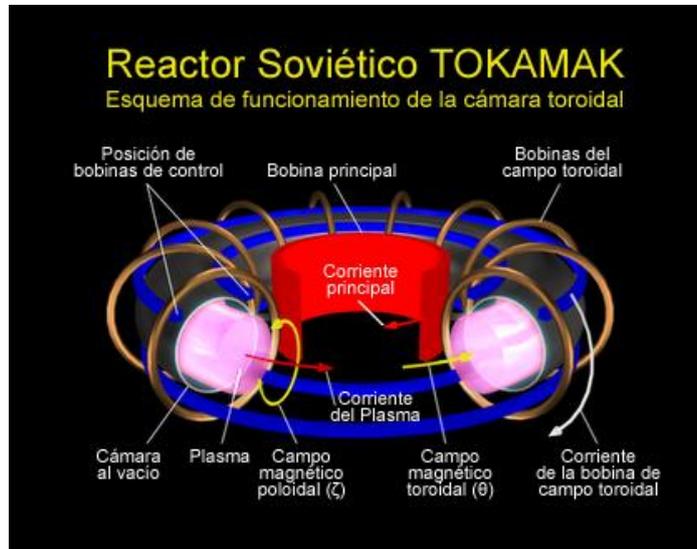


Figura 10- Reactor de fusión Tokamak. Fuente: <https://sputnik87.wordpress.com/tag/reactor-tokamak/>

- o Stellarator, inventado y construido por Lyman Spitzer en 1951 en la universidad de Princeton, de forma aproximada a un toroide. Los grupos de bobinas son iguales al Tokamak a excepción del grupo de las bobinas poloidales que está situado en el exterior del reactor. Su funcionamiento es continuo.

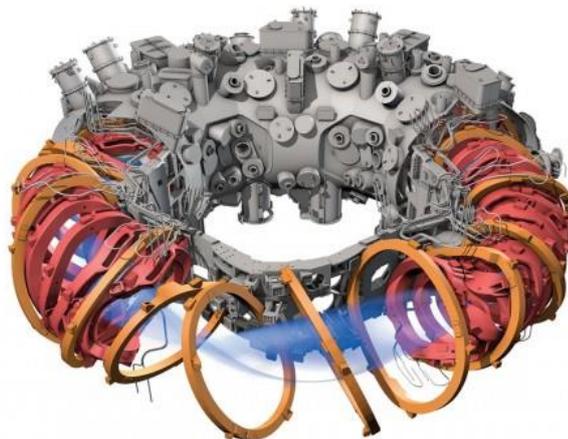


Figura 11- Reactor de fusión Stellarator Wendelstein 7-X. Fuente: <http://www.scientia.ro>

Por el momento el reactor más usado es el Tokamak, se podría decir que el Tokamak va una generación por delante del Stellarator, de hecho, es el diseño escogido para la realización del proyecto ITER, proyecto muy ambicioso que tiene como fin el éxito de la fusión nuclear controlada, de lo cual se hablará más adelante.

- Confinamiento inercial, se basa en la generación muy rápida de energía antes de que a el plasma inflamado le dé tiempo¹¹ a expandirse. Para ello el combustible en forma de bola pequeña a baja temperatura es calentado a una velocidad muy elevada desde la superficie exterior, resultando en un plasma que se comprime hasta alcanzar densidades muy elevadas y temperaturas termonucleares. En este caso se usan impulsores formado por un conjunto de haces (de láser o de partículas energéticas) distribuidos análogamente alrededor de la bola, que producen una radiación esféricamente simétrica.

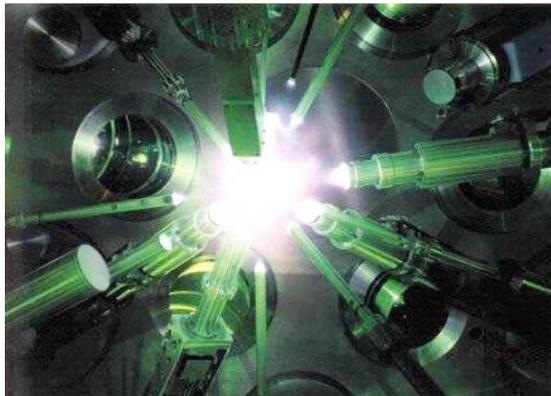


Figura 12- Haces de láser. Fuente: <https://ccmrecursosnaturals.wordpress.com/alternativas-alternativas/>

Pese a que en un inicio el confinamiento inercial es más simple conceptualmente, es el menos desarrollado de los dos. No obstante, en la actualidad está teniendo más acogida debido a que los haces láser usados son de interés en la industria militar, haciendo que su desarrollo vaya en aumento, aunque ciertos aspectos aún están restringidos para el uso civil.

1.4. Percepción de la Energía Atómica en la sociedad española

En la creencia popular, existe mucha falta de conocimiento y falsos mitos, muchos de ellos debido a los medios de comunicación, los cuales no tienen base científica ni sentido alguno pero que la sociedad toma por válidos cuando realmente no es así, en parte ello debido a que a lo largo de los años ha habido una serie de accidentes nucleares, algunos por error humano, coincidencias y malas decisiones o una combinación de todos ellos y otros por la propia naturaleza en sí, que tan poderosa es que un día nos deleita con una aurora boreal y otro se lleva vidas y arrastra edificaciones con tsunamis, terremotos o volcanes.

Pero en un país como España donde la energía nuclear es de gran importancia, ya que genera más del 20% de la energía eléctrica en base, que aún sigan existiendo estas controversias denota desinterés por parte de la sociedad y mucha falta de información.

¹¹ Este tiempo es de 10 nanosegundos (10^{-8} s), pasado ese tiempo el plasma se expande y se enfría.



Figura 13- Manifestación antinuclear. Fuente: http://kronologia.blogspot.com.es/2011_05_01_archive.html

Resaltar también que esto es en parte debido a que como pasa con otros sucesos, en lo referente a la energía nuclear solo se informa acerca de los accidentes y/o catástrofes y de los proyectos armamentísticos, todo el mundo tiene noción o ha oído hablar de que en Hiroshima y Nagasaki se lanzaron bombas atómicas a finales de la segunda guerra mundial pero poca gente conoce el funcionamiento de una central nuclear o que la radiactividad se usa también con fines médicos.

En lo referente a los accidentes nucleares a nivel mundial cabe destacar el de la central de Three Mile Island acontecido el 28 de marzo de 1979 en Pensilvania, en el que se vertieron alrededor de 2,5 millones de curios de gas radiactivo debido a una fusión parcial del núcleo del reactor.

Pero los más conocidos son el de Chernobyl y Fukushima. En el caso de Chernobyl, localizada cerca de la ciudad de Prypiat (actualmente Ucrania antes antigua URSS), se produjo el 26 de abril de 1986 mientras realizaban una prueba que en teoría aumentaría la seguridad de la central, trataban de averiguar durante cuánto tiempo la turbina de vapor continuaría generando energía eléctrica una vez cortada la afluencia de vapor, averiguando así, si la inercia de la turbina sería suficiente para mantener las bombas de refrigeración en funcionamiento, sin entrar en amplios detalles, esto desembocó en un calentamiento excesivo del reactor número 4 originando dos explosiones, ninguna de ellas nucleares pero si suficientes para volar la tapa del reactor y las paredes de hormigón de la sala del reactor esparciendo combustible nuclear y material radiactivo a la atmósfera. La explosión directamente solo se cobró dos vidas humanas pero la fuerte exposición a la radiactividad se cobró miles de vidas, entre liquidadores y personas que estaban cerca de la zona del incidente, así como cánceres y leucemias asociados a dicha radiactividad a lo largo de los años.

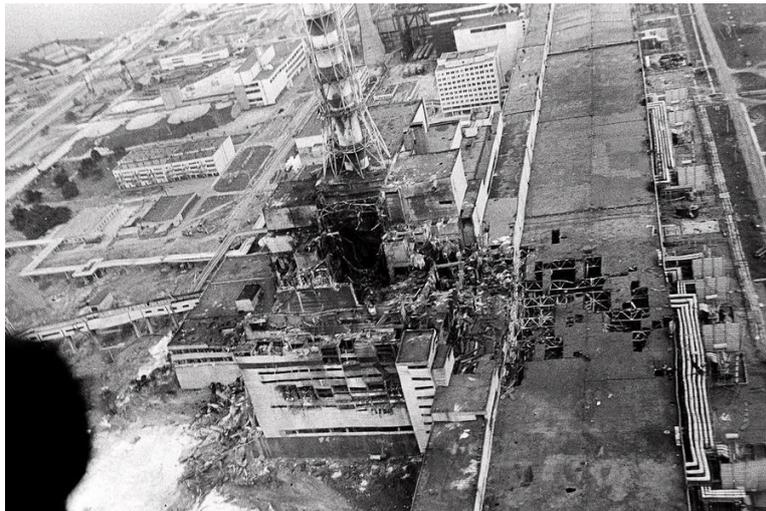


Figura 14- Reactor número 4 después de la explosión sin la tapa de hormigón.
Fuente: <http://www.actuallynotes.com/Chernobil-metafora-del-final-de-la-URSS.html/>

No obstante, el más sonado fue el ocurrido en Fukushima Dahiichi, Japón en marzo de 2011. Un terremoto de 8.9 grados en la escala Richter sacudió la costa noroeste de Japón, dejando todas las líneas de red eléctrica fuera de funcionamiento, pese a ello la central nuclear aguantó el terremoto aun estando diseñada para aguantar hasta 8 en dicha escala. La central se apagó inmediatamente como medida de seguridad, al no tener suministro eléctrico para refrigerar el reactor los generadores diésel empezaron a funcionar. No obstante, al terremoto le siguió un tsunami que inundó la zona de la central dejando inutilizados los generadores diésel, pese a ello se dispone de unas baterías de emergencia que pueden asistir a las bombas durante 8 horas. Pasado ese tiempo no recuperaron el suministro eléctrico para asistir al sistema de refrigeración, lo que desencadenó en un calentamiento excesivo de los reactores terminando en una emisión de partículas radiactivas al exterior.

Debido a estos accidentes, la sociedad ha visto amenazada su tranquilidad y desconfía de la energía atómica y de su seguridad. Pese a ello, las centrales nucleares son de las más seguras que existen y las que menos impacto ambiental tienen, disponiendo de elementos activos y pasivos de seguridad, si bien su seguridad nunca es total, puesto que esto es imposible.

El único problema de contaminación asociado a las centrales de fisión es la gestión y almacenaje de los residuos radiactivos¹², básicamente los de alta actividad, que es combustible nuclear gastado ya que pueden llegar a perdurar millones de años. Para almacenar dichos productos procedentes de las centrales españolas se intentó construir un Almacén Temporal Centralizado o ATC, pero la fuerte oposición social evitó que llegara a buen cauce, teniendo que enviar dichos productos a plantas reprocesadoras de combustible nuclear gastado al exterior de España, con el sobrecoste que esto conlleva

¹² La fisión nuclear genera residuos de baja y media actividad y de alta actividad. Los de baja y media actividad tienen un periodo de desintegración igual o menor a 30 años y los de alta actividad lo poseen mayor a 30 años, pero además pueden emitir calor por dicha actividad.



2. Objeto y alcance del estudio

El presente estudio versa sobre un análisis computacional mediante simulaciones con autómatas celulares para establecer analogías con el transporte de partículas y energía en plasmas de fusión nuclear. Se analizarán los procesos que generan transporte radial de partículas en dispositivos de fusión termonuclear por confinamiento magnético. Para ello, se utilizará un sandpile difusivo, que es un autómata celular unidimensional. Se trata de averiguar el efecto de los parámetros que definen el sandpile sobre los perfiles de densidad en estado estacionario y sobre los flujos de transporte de partículas, ya sean estos últimos originados por avalanchas (canal de transporte turbulento) o por difusión (canal de transporte difusivo). Este punto es central a la hora de obtener energía de fusión, como recurso energético virtualmente inagotable.

Para ello se llevará a cabo una caracterización teórica de:

- La fusión nuclear.
- Cómo funciona el código computacional utilizado.
- Los parámetros de la simulación y su influencia en la misma.

Se abordarán también los resultados obtenidos en dichas simulaciones, así como posibles soluciones del problema y las distintas configuraciones para llevar a cabo la fusión nuclear.



3. Estado del arte

3.1. Análisis teórico de la fusión nuclear

Como ya se dijo anteriormente la fusión es la reacción nuclear en la que dos átomos ligeros se unen para formar uno pesado. Normalmente esta reacción se produce en un estado de plasma ya que los átomos de los elementos involucrados deben superar la repulsión eléctrica (barrera de Coulomb), aproximándose lo suficiente para que la atractiva fuerza nuclear fuerte funda las partículas, lo que necesita de temperaturas extremadamente altas. En este tipo de reacciones se libera energía que proviene de la pérdida de masa de las partículas reactantes frente a las producidas, lo que se conoce como defecto de masa, para cuantificar esa masa en energía basta con aplicar la ecuación postulada por Albert Einstein donde:

$$E = mc^2 \quad (1)$$

La cuantificación de esa energía se conoce por energía de enlace del núcleo, la cual oscila entre valores de 2.2 MeV¹³ para el deuterio y 1640 MeV para el bismuto-209. Pero para hablar de esta energía de enlace del núcleo es más común referirse a energía de enlace por nucleón, que resulta del cociente de la primera entre el número de nucleones¹⁴ del núcleo considerado. La energía de enlace por nucleón aumenta con el número de nucleones hasta llegar al hierro, donde se fijaría el límite, lo que se conoce también por pico del hierro, siendo éste el más estable de todos los núcleos. Por debajo de él los núcleos liberan energía al producirse dicha reacción y por encima deben absorberla para llevarla a cabo. Como resultado, los elementos que están por debajo son aptos para la fusión nuclear y los que están por encima lo son para la fisión nuclear. En la gráfica siguiente se puede apreciar lo anteriormente comentado.

¹³ Se conoce por eV al electronvoltio, unidad de energía que representa la energía cinética que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio. Equivale a $1,602176462 \times 10^{-19}$ J.

¹⁴ Partículas que forman el núcleo de un átomo, los protones (con carga positiva) y los neutrones (sin carga).

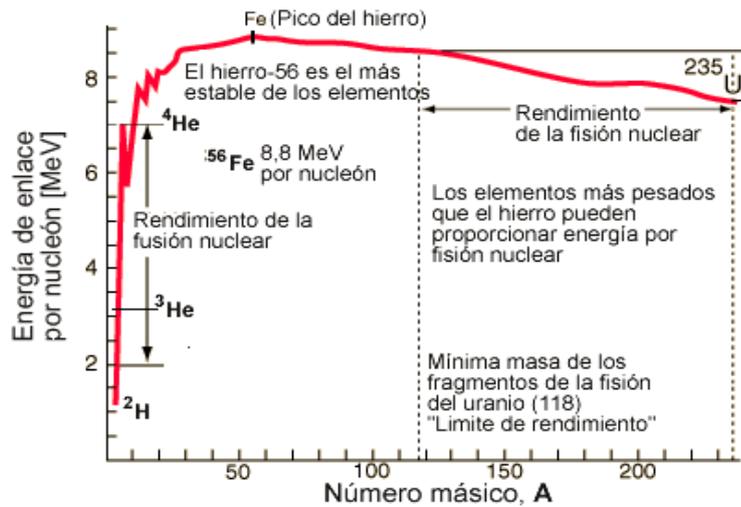
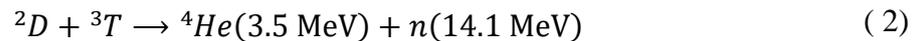


Figura 15- Energía de enlace por nucleón en función del número másico. Fuente: <http://forum.lawebdefisica.com>

La reacción de fusión más común está formada por átomos de hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio) dando como resultado un núcleo de Helio-4 y un neutrón de alta energía:

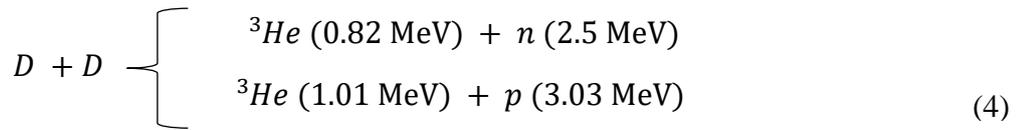


Desde el punto de vista energético, esta reacción es la más viable al ser la que presenta mayor sección eficaz, además apuntar que en nuestro planeta el deuterio se encuentra en una cantidad sustanciosa ya que entorno a un 0.015% del agua es agua pesada formada por D₂O. Sin embargo, el tritio al poseer actividad radiactiva y una vida media de casi 12 años es bastante escaso. No obstante, gracias a dos reacciones de fusión combinando un neutrón con litio¹⁵ se genera tritio:



La reacción (2) es la que se usará en los reactores de primera generación, los cuales deberán tener una pequeña aportación de tritio inicial para que se produzca la reacción y un recubrimiento de litio para producir tritio. Sin embargo, existen otras reacciones de fusión que seguramente sean usadas en reactores de segunda generación pero que de momento han sido descartadas, las cuales evitarían el uso de litio para generar tritio ya que como producto de la reacción se genera tritio.

¹⁵ A diferencia del tritio o del deuterio, el litio se encuentra en una cantidad muy abundante en la corteza terrestre con lo que no debemos preocuparnos por quedarnos sin reservas a corto plazo.



Existen dos razones principales para que se escogiera la reacción de fusión del deuterio y tritio, la primera es que debido a que produce un neutrón como producto de la reacción, la energía cinética del mismo se utiliza para transformarla en calor en las paredes del núcleo y así poder turbinar y generar energía, otras reacciones al ser aneutrónicas, generando iones como producto de la reacción, se deberían usar otros métodos que aún no controlamos para producir energía eléctrica. La segunda razón reside en que la sección eficaz de esta reacción es mayor. La sección eficaz se define como el tamaño efectivo del núcleo para que se produzca la reacción, caracterizando así la probabilidad de que dicha reacción se lleve a cabo. Tiene unidades de área y un valor de 10^{-28} m^2 que equivale a un barn.

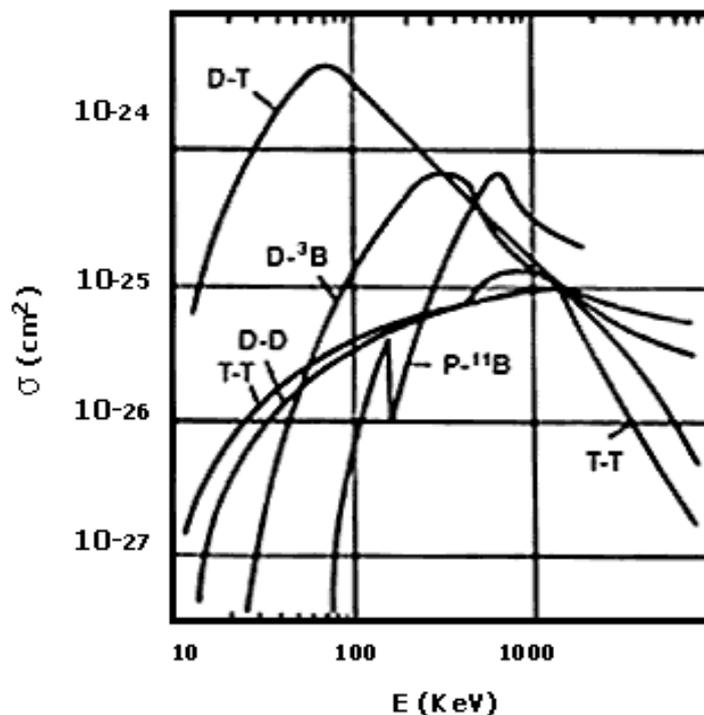


Figura 16- Sección eficaz para reacciones de fusión, en función de la energía cinética que tienen los dos núcleos antes de la reacción. Fuente: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>

3.1.1 Qué es un plasma

Un plasma es un fluido formado por electrones (partículas con carga negativa) e iones (partículas con carga positiva). En cierto modo, los plasmas se comportan como gases, excepto que los primeros están formados por partículas cargadas, que hace que sus propiedades sean diferentes. En particular, los plasmas son buenos conductores de la electricidad y responden fuertemente ante la presencia de campos electromagnéticos. Las partículas cargadas de los plasmas se forman debido a que, al haber sido calentados a altas temperaturas, los átomos o moléculas que lo componen, generalmente neutros, dejan de serlo debido a que los electrones se desvinculan de los núcleos atómicos. El plasma es el llamado cuarto estado de la materia.

En los plasmas como en los gases, las partículas que lo forman se desplazan ininterrumpidamente, con velocidades muy diversas. Para estudiar estas velocidades se utiliza la distribución de Maxwell, que representa las distintas velocidades a las que se mueven las partículas del plasma o gas en un estado de equilibrio.

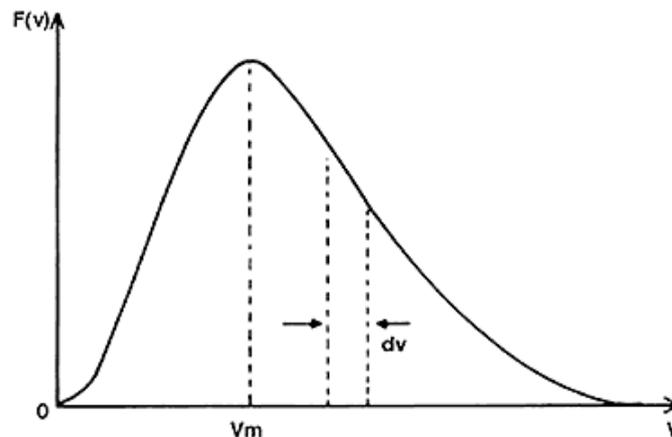


Figura 17- Función de distribución de Maxwell para los átomos (o moléculas) de gas en equilibrio térmico.
Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/sec_5.htm

Presenta un pico que señala que la mayoría de las partículas se mueven con velocidades similares, alrededor de la llamada velocidad térmica, v_t , que en este caso es prácticamente similar a V_m . Su anchura y posición dependen de la temperatura del fluido. Sin embargo, apuntar que también existen partículas con velocidades elevadas en la cola de la distribución. Aunque en baja proporción, su existencia es importante para la fusión.

Esta distribución es importante para la fusión nuclear puesto que sobre ella se promedia la sección eficaz, obteniendo así la probabilidad de fusión para una plasma. El promedio más interesante es el del producto de la sección eficaz s por la velocidad de las partículas v , que se denomina “ sv ”, pues esto evalúa la probabilidad de reacción por unidad de tiempo. En la figura 18 se muestra este valor en función de la temperatura de la maxwelliana utilizada en el promedio, para las mismas reacciones consideradas en la figura 16. En el caso de la temperatura se usan unidades de energía en lugar de grados

para obtener así una mejor idea del nivel de excitación que tienen las partículas que forman el plasma y además es válido para compararla con las energías de las partículas individuales.

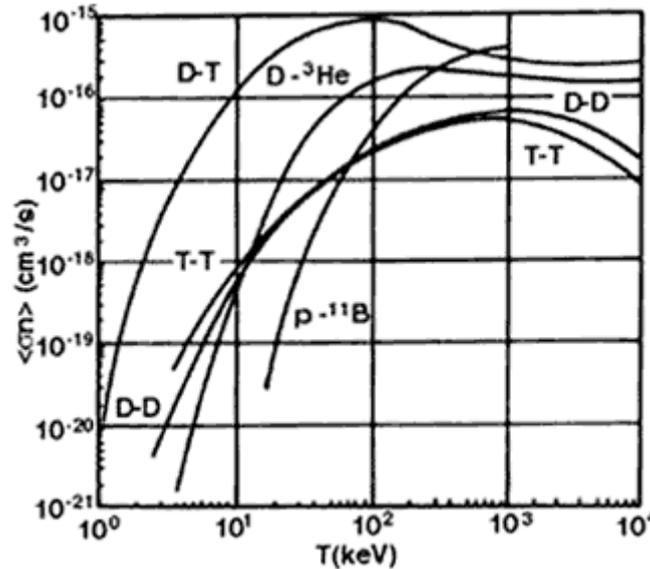


Figura 18- Tasa de reacción σ para las principales reacciones de fusión, como la temperatura del gas.
Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/sec_5.htm

La potencia generada en un plasma es distributiva a la cantidad promedio de reacciones por unidad de tiempo (caracterizado por la probabilidad de reacción y la densidad de las partículas reactantes) y a la energía liberada por la propia reacción. Según el combustible empleado, la potencia será mayor o menor; como era de esperar, la máxima potencia se alcanza con la reacción de D-T, debido a que la probabilidad de fusión y la energía obtenida gracias a ella son grandes en comparación con otras reacciones. Parte de esta potencia se usará para mantener al plasma caliente, que normalmente es la que llevan las partículas alfa, ya que son las más simples de manejar. La potencia restante se utilizaría para obtener energía eléctrica.

3.1.2 Tipos de confinamiento

Previamente se ha hablado sobre confinamiento inercial y magnético. No obstante, ahora nos centraremos más en el magnético, ya que es el más extendido y estudiado durante los últimos 30 años. Además, las simulaciones de este trabajo se configuran para un reactor por confinamiento magnético.

3.1.2.1. Confinamiento magnético

Como se comentó anteriormente el confinamiento magnético se obtiene creando un campo magnético toroidal de muy elevada intensidad generado por bobinas de campo que usan una corriente muy fuerte. En este caso la fusión se obtiene con grandes volúmenes de plasma y bajas densidades de iones, durante tiempos de confinamiento largos, en torno a un segundo y medio. Su principio se basa en que una partícula con carga siente la fuerza de Lorentz debida al campo magnético. De manera vectorial se tiene que:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (5)$$

El fundamento reside en que las partículas cargadas del plasma, como los iones y los electrones, se ven forzadas, gracias a los campos magnéticos, a tener órbitas circulares y a formar hélices sobre las líneas de campo. A su vez, éstas se pueden mover con total libertad en la dirección longitudinal de las líneas de campo.

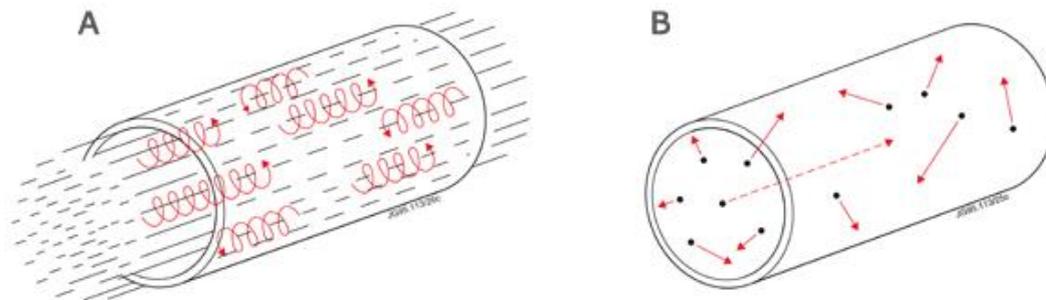


Figura 19- Partículas desplazándose alrededor de las líneas de campo magnético helicoidalmente frente a partículas moviéndose sin líneas de campo magnético. Fuente: <http://www.scienceinschool.org/2012/issue22/fusion>

En dicho campo las partículas se mueven en órbitas, caracterizadas como el radio de Larmor, obtenido al igualar la fuerza de Lorentz con la fuerza centrípeta y determinado por:

$$\rho_L = \frac{mv}{qB} \quad (6)$$

Como se aprecia en la ecuación (6), el radio de Larmor depende de la masa de las partículas, su velocidad, su carga eléctrica y la intensidad del campo magnético. Tomando como valores la velocidad térmica de los iones de hidrógeno y un campo magnético de un Tesla, válido para apreciar el orden de magnitud, se obtiene un $\rho_{L=1\text{ cm}}$, mientras que para los electrones dicho valor es de 0.1 mm. Ahora con estos datos y suponiendo un tiempo de confinamiento de 1 segundo, la distancia media que las partículas tendrían que transitar para obtener valores de ganancia aceptables sería de un valor superior a los 1000 km, lo que son dimensiones impensables para un reactor de fusión.

Pero dicho problema es atajable gracias a la generación de un campo magnético poloidal frente al toroidal para hacer que las líneas de campo se cierren sobre sí mismas creando superficies magnéticas anidadas entre sí evitando así la expulsión del plasma hacia las

paredes del reactor, lo que supondría una contaminación del plasma, así como una pérdida de temperatura del mismo.

En este tipo de confinamiento, hay varios métodos para calentar el plasma, el principal es el famoso método de calentamiento óhmico, para el cuál se usan corrientes eléctricas para crear un campo electromagnético; actuando el plasma como secundario de un transformado y aumentando la velocidad con que se desplazan las partículas, generando un aumento de temperatura. Los métodos de calentamiento auxiliar son la inyección de haces de partículas neutras de alta energía, que distribuyen su energía mediante colisiones mayoritariamente con los iones del plasma, y el calentamiento mediante ondas de radiofrecuencia ión-ciclotrón, que transfiera la energía de las ondas a los iones en resonancia con la onda; es decir, solo afecta a los iones que estén en su misma frecuencia, las colisiones subsiguientes transmiten esta energía a las partículas no resonantes del plasma.

3.1.2.2. Confinamiento inercial

Se basa en la generación muy rápida de energía antes de que a el plasma inflamado le dé tiempo a expandirse. Para ello el combustible en forma de bola pequeña o pellet a baja temperatura es calentado a una velocidad muy elevada desde la superficie exterior, resultando en un plasma que se comprime hasta alcanzar densidades muy elevadas y temperaturas termonucleares, generando así una implosión nuclear propagando el calor hacia el exterior hasta la ignición del plasma. Todo es sucede en un tiempo de 10 nanosegundos (10^{-8} s). Normalmente los pellets se congelan para darles su forma y suelen estar formados por deuterio y tritio.

Para calentar el combustible se usan impulsores formados por un conjunto de haces (de láser o de partículas energéticas) distribuidos análogamente alrededor de la bola, que producen una radiación esféricamente simétrica. Dichos haces deben ser muy precisos y capaces de concentrar la energía en regiones concretas y muy pequeñas debido a que el diámetro del pellet es de unos solos milímetros.

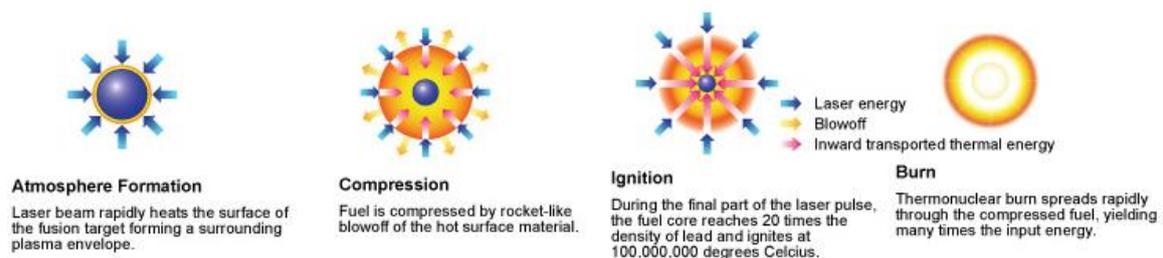


Figura 20- Pasos en la ignición de un pellet de combustible con breve explicación. Fuente: <http://francis.naukas.com/>

3.1.3 Tipos de dispositivos confinantes

Este apartado del trabajo se centrará en los dos dispositivos principales para confinamiento magnético, el reactor Tokamak, el más desarrollado y sobre el cual se hablará más a fondo puesto que las simulaciones del propio trabajo están definidas para dicho tipo de reactor y el reactor Stellarator, otra configuración menos desarrollada pero no por ello se dejará de abordar. No obstante, aunque no se vaya a hablar aquí en este trabajo, indicar que existen dispositivos confinantes como el NIF, situado en Estados Unidos y el Laser MegaJoule (LMJ) en Francia, que basan su esquema de funcionamiento en confinamiento inercial.

3.1.3.1. Reactor Tokamak

Desarrollado en la Unión Soviética por los científicos rusos Sajarov y Tamm en 1951 es un reactor que tiene forma toroidal (se asemeja a un donut con agujero) y forma axisimétrica. En el tokamak se generan dos campos magnéticos principales. El primero es el campo toroidal, producido por una bobina de un material superconductor, minimizando así las pérdidas eléctricas debido al efecto Joule. Este campo se genera debido a que se usa al plasma como secundario de un transformador, calentando así también el propio plasma. Que la corriente se genere por efecto transformador posee dos desventajas, el sistema no puede prolongar la corriente toroidal indefinidamente por métodos puramente inductivos y además su funcionamiento es pulsado, es decir, no es continuo. Asimismo, las enormes corrientes que circulan (del orden de Mega-amperios) crean inestabilidades, pudiéndose generar disruptions en las que el confinamiento desaparece de repente y el calor y las partículas del plasma escapan hacia la pared, deteriorando los materiales de la misma y alejándose de las condiciones de fusión.

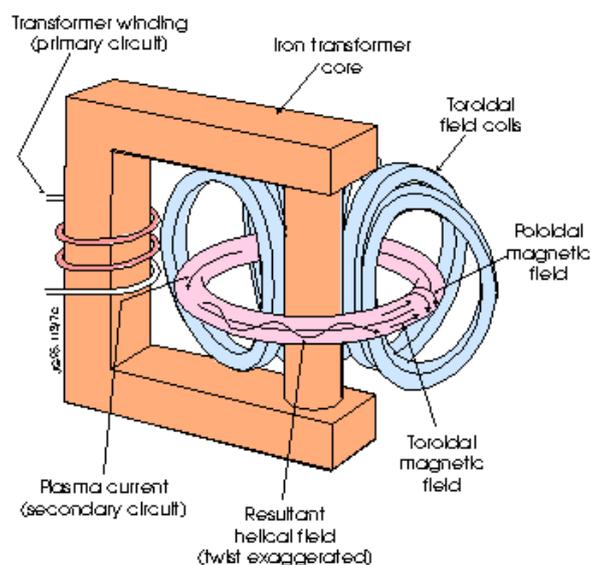


Figura 21- Generación del campo magnético en un reactor Tokamak.

Fuente: http://ffden-2.phys.uaf.edu/103_fall2003.web.dir/tim_chrisman/what%20is%20fusion.htm

La segunda componente es la del campo poloidal, generada por la corriente que atraviesa el plasma. La combinación de ambos campos da lugar a que las líneas de campo de las superficies magnéticas se enrosquen hacia sí, evitando así en gran modo que el plasma se escape hacia los bordes y quede bien confinado.

El reactor de este tipo más exitoso hasta la fecha es el JET¹⁶, construido en una antigua base de la RAF a las afueras de Oxford, obteniendo un resultado de ganancia $Q \cong 0.7$. Se espera que el proyecto ITER que está todavía en vías de desarrollo, del cual se hablará en un apartado posterior, supere los resultados obtenidos en el JET.

3.1.3.2. Reactor Stellarator

El stellarator fue inventado por Lyman Spitzer en 1950 y construido en la universidad de Princeton un año más tarde. También tiene forma de toroide pero la principal diferencia frente al Tokamak es que en el stellarator el campo magnético poloidal se crea mediante bobinas exteriores al plasma. Consecuentemente, en el plasma no hay corrientes apreciables, y además todas las componentes del campo magnético son creadas por las bobinas externas. También difieren en configuración, el stellarator posee una compleja geometría constitutiva a su tridimensionalidad, lo que resulta en una gran dificultad a la hora de diseñar componentes del mismo, tales como las bobinas.

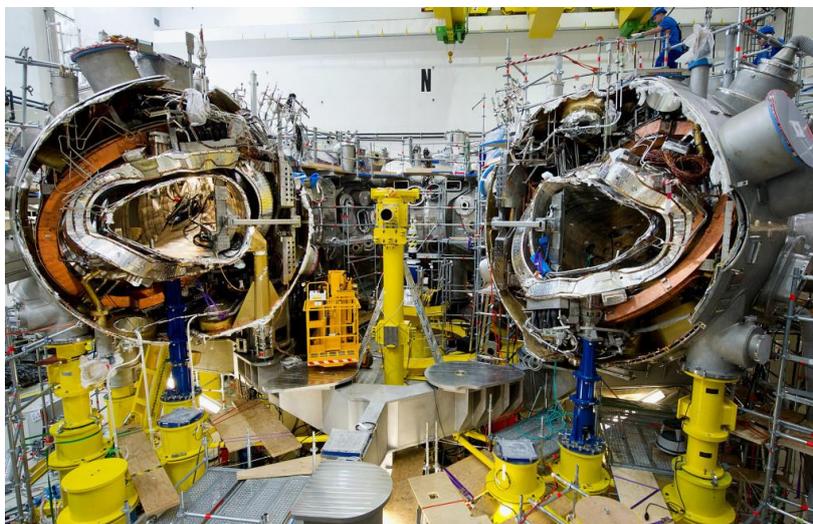


Figura 22- Geometría compleja del reactor Stellarator. Fuente: <http://fusion4freedom.us/>

Es capaz de funcionar en modo continuo ya que no hay corrientes inducidas en el plasma, siendo esta su principal ventaja frente al tokamak. Gracias a ellos se obvian las inestabilidades propias a la existencia de corrientes, principalmente las disrupciones. Posee gran versatilidad, es posible variar externamente las corrientes en las bobinas, modificando sencillamente la configuración magnética. Sin embargo, precisa de sistemas

¹⁶ Joint European Torus.



auxiliares de calentamiento al carecer de calentamiento óhmico como los que detenta el Tokamak.

3.1.4 Transporte en plasmas de fusión

Uno de los mayores problemas de la fusión termonuclear controlada es el concerniente al tiempo de confinamiento de las partículas y energía. En una hipotética situación ideal en la que no hubiese colisiones entre las partículas ni derivas, las partículas estarían firmemente unidas a las líneas de campo magnético, consecuentemente no habría fugas y el tiempo de confinamiento sería infinito. Pero en la realidad esto no es así, hay colisiones entre las partículas de modo que pueden fugarse de la línea de campo y finalmente el confinamiento desaparece debido a que se fuerza al plasma a estar en un estado muy dispar del equilibrio termodinámico. Para ayudar a comprender estos fenómenos surgió una rama de la física de plasmas, el estudio del transporte, que tiene por misión analizar cuáles son los mecanismos que menoscaban el confinamiento y caracterizarlos dependiendo de los diferentes parámetros de funcionamiento de los mismos.

A lo largo de muchos años el transporte en el plasma ha sido progresivamente estudiado por la teoría clásica y neoclásica de colisiones. A pesar de ello, los resultados experimentales demostraron que la difusión de partículas y energía es mayor de lo esperado, esto indica la presencia de un proceso de transporte no conocido, al que se le conoce por transporte anómalo.

3.1.4.1. Transporte clásico y neoclásico

Históricamente, el estudio del transporte en un plasma empezó desde la perspectiva de las colisiones clásicas, principalmente debido a que es el modelo más sencillo y aún no había estudios referentes al tema. En dicho campo, se asume que el proceso de transporte, tanto de partículas como de energía, es difusivo y es creado por la existencia de gradientes¹⁷ de densidad y temperatura. Los flujos de partículas y calor, Γ y q , son proporcionales a los gradientes:

$$\begin{aligned}\Gamma &= -D\nabla n \\ q &= -k\nabla T\end{aligned}\tag{7}$$

Lo que se conoce por la ley de Fick, donde “k” es la conductividad térmica y “D” el coeficiente de difusión.

¹⁷ En física por gradiente se conoce a la variación de una magnitud en función de la distancia, a partir de la línea en que esta variación es máxima en las magnitudes cuyo valor es distinto en los diversos puntos de una región del espacio.



Existe un mecanismo que se conoce por random walk en el cual se supone que las partículas realizan desplazamientos de magnitud Δr en un tiempo característico Δt . Pasado un breve periodo de tiempo, Δt , otro desplazamiento Δr es ejecutado y así continuamente. Dicha expresión queda definida por:

$$D \sim \frac{(\Delta r)^2}{\Delta t} \quad (8)$$

Debido a que el plasma está totalmente ionizado, las interacciones básicas entre partículas se deben a colisiones colombianas, por lo que la distancia media en cada colisión es del orden del radio de la órbita de Larmor $\Delta r \sim \rho_L$, a la vez que el tiempo característico se obtiene gracias al inverso de la frecuencia de colisión entre partículas $\Delta t \sim \nu^{-1}$.

Si se toman las líneas de campo magnético rectas, se habla de la difusión clásica. Por el contrario, si se tiene en cuenta la geometría del reactor, se habla de transporte neoclásico. Aquí, se tiene en cuenta que el campo magnético no es homogéneo, por lo que la trayectoria de las partículas no es exactamente helicoidal, dado que su desplazamiento posee una componente transversal a las líneas magnéticas, conocida por deriva, originando que las pérdidas de las colisiones sean mayores.

Un ejemplo de deriva sería las conocidas órbitas banana, en las cuales la forma de la proyección de las órbitas de las partículas atrapadas sobre un plano poloidal recuerda a un plátano.

3.1.4.2. Transporte Anómalo

Los pronósticos del transporte clásico y neoclásico no son adaptables con total generalidad, ya que se contemplan casos donde el transporte es claramente mayor. No es nada raro darse con situaciones en las que los escalones de transporte superan en un orden de magnitud las predicciones neoclásicas. Consecuentemente se da la existencia de una componente del transporte llamada anómala, la cual es responsable de la divergencia entre la teoría y el experimento.

En este tipo de transporte no solo se dan colisiones, sino que también existe lo que se conoce por turbulencia, fenómeno de la física de fluidos que surge cuando la velocidad del fluido supera un umbral. Esta turbulencia se genera debido a ciertas micro-inestabilidades que se manifiestan en el sistema. Estas inestabilidades aparecen puesto que el plasma no se encuentra en un equilibrio termodinámico, aconteciendo fuertes gradientes de densidad, presión y temperatura. Cuando aparece la turbulencia, varios modos normales del sistema empiezan a excitarse, sirviéndolos de alimento para ello la energía libre localizada sobre algunas superficies magnéticas. Encima de estas superficies aparecen vórtices, que no son más que la interacción entre modos excitados que se unen para formar estructuras rotantes.



3.1.5 Condiciones para la fusión nuclear

Para que el reactor sea eficiente, es decir, entregue más potencia de la que consume incluyendo las pérdidas por radiación bremsstrahlung¹⁸ y el transporte de partículas, el plasma debe cumplir una serie de condiciones de densidad y temperatura. Dichas condiciones se recogen en el criterio de Lawson, establecido por John Lawson en 1957 determinando las condiciones mínimas para la fusión productiva, que se corresponde con el producto de la densidad de iones y el tiempo de confinamiento. En la siguiente tabla se pueden encontrar valores del criterio de Lawson para dos reacciones de fusión nuclear distintas, así como de los parámetros que lo definen, ajustados al rango de temperatura de 100 millones de grados.

Tabla 1- Criterio de Lawson y parámetros involucrados. Fuente: elaboración propia

Criterio de Lawson	$n\tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3$	Deuterio-Tritio
	$n\tau \geq 10^{16} \text{ s/cm}^3$	Deuterio-Deuterio
Densidad de Iones	$n\tau \geq 2 \times 10^{14} \text{ s/cm}^3$	Deuterio-Tritio
	$n\tau \geq 5 \times 10^{15} \text{ s/cm}^3$	Deuterio-Deuterio
Tiempo de Confinamiento	$\tau = \frac{2 \times 10^{14}}{n} \text{ s}$	Deuterio-Tritio
	$\tau = \frac{5 \times 10^{15}}{n} \text{ s}$	Deuterio-Deuterio

La densidad de iones depende de la reacción que se lleve a cabo, pero debe mantenerse una cantidad crítica para que la probabilidad de colisión entre núcleos sea elevada consiguiendo así un rendimiento neto de la reacción.

El tiempo de confinamiento se define como el tiempo que el plasma permanece a una temperatura mayor que la temperatura de ignición crítica. Para que se alcance un valor de ganancia Q, que es el cociente de la energía producida por el sistema entre la energía entregada al sistema, mayor que la unidad, el plasma debe permanecer a esta temperatura durante un intervalo de tiempo mínimo.

¹⁸ Radiación de frenado o Bremsstrahlung (del alemán bremsen "frenar" y Strahlung "radiación") es una radiación electromagnética producida por la desaceleración de una partícula cargada, como por ejemplo un electrón, cuando es desviada por otra partícula cargada, como por ejemplo un núcleo atómico.

3.1.6 Proyecto ITER

ITER, proviene del griego y significa camino, es un experimento científico de reactor de fusión termonuclear en vías de desarrollo por diversas potencias mundiales, las cuales tratan de hacer viable la producción de energía mediante fusión nuclear. Su construcción está emplazada en Cadarache, Francia.

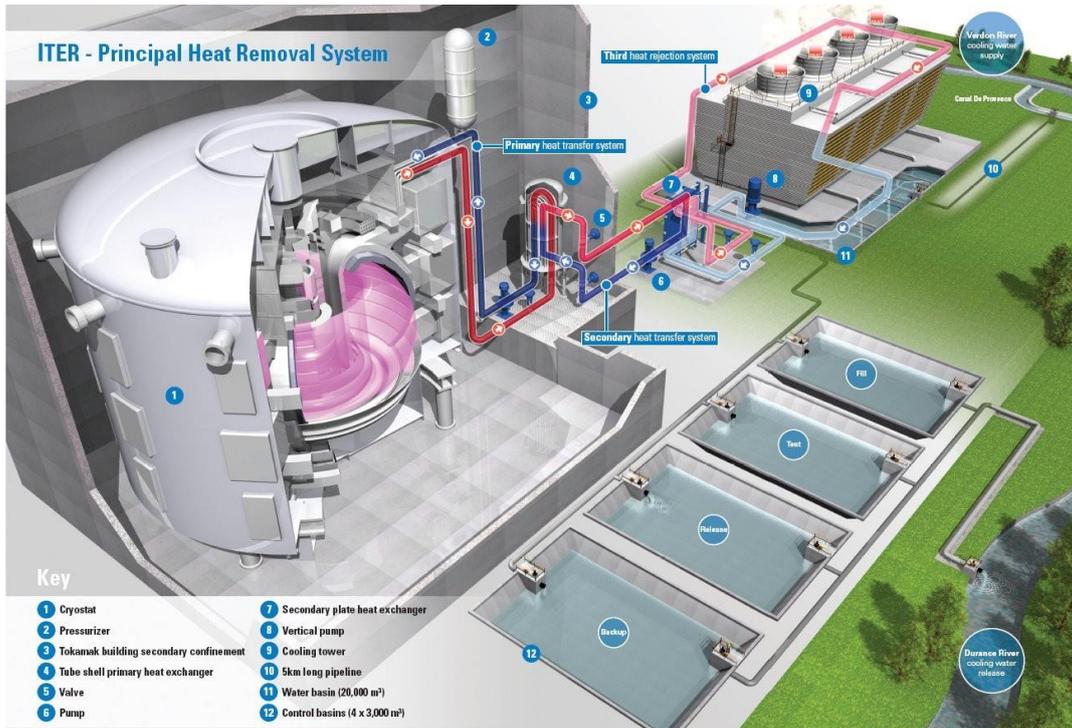


Figura 23- Instalaciones del ITER en Cadarache, Francia.

Fuente: <https://www.taringa.net/posts/imagenes/19012207/Reactor-Internacional-de-Fusion-ITER-Francia.html>

El proyecto ITER tiene como misión probar todos los elementos que constituyen una central de fusión para construir un futuro reactor de fusión nuclear a escala comercial. Se intentará superar el ya comentado breakeven. Sin embargo, no se obtendrá energía eléctrica ya que no está diseñado con tal fin.

Además, ITER tiene otros objetivos tales como integrar las tecnologías básicas de un reactor nuclear de fusión, mantenimiento remoto, bobinas superconductoras. También se realizarán tests de los componentes básicos del reactor, como puede ser el manto generador de tritio, ya que nunca se ha podido demostrar si la generación de tritio es viable en una cámara de vacío como la de dicho reactor. Probar las características de seguridad de los reactores de fusión es otro de sus objetivos.



Tabla 2- Dimensiones y características principales del ITER.
Fuente: <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/iter/iter02.htm>

Radio Mayor (m)	6.2
Radio Menor (m)	2
Volumen del Plasma (m ³)	837
Campo Toroidal (T)	5.3
Corriente del Plasma (MA)	15
Duración del Pulso (s)	>300
Potencia de Calentamiento (MW)	73

Para el cumplimiento de todos estos objetivos se estipuló que en el año 2020 el reactor ya estaría ensamblado y que para el 2027 podría funcionar por primera vez, pero han surgido retrasos y aún no existen fechas definitivas.



3.2. Estudio científico relativo a la fusión nuclear

En este punto, después de haber descrito la fusión nuclear en sí, así como aspectos de ella que son relevantes para la realización de este TFG, se hará una revisión del estado del arte de los artículos, bibliografía específica y resúmenes con la finalidad de conocer cómo está el panorama actual entorno a la investigación científica en dicho campo, intentando así dar una mejor perspectiva a este estudio.

Para el análisis se utilizará una base de datos. El nombre de dicha base es Scopus, y ha sido seleccionada ya que es una de las que mejores resultados proporciona en cuanto a calidad se alude. El acceso a esta base de datos está proporcionado por la Universidad de Cantabria y su registro es sumamente sencillo, basta con introducir tu nombre de usuario y contraseña de la cuenta asociada a la universidad de Cantabria.

Para realizar búsquedas en esta base de datos basta con introducir campos de palabras asociados al tema correspondiente con la finalidad de delimitar aquello que se quiere buscar, siendo lo más recomendable el uso de palabras clave, ya sean solas o en grupos, para poder acotar aquellas publicaciones de mayor importancia para el estudio. Se dispone también de una opción para acotar el rango temporal que se quiere abarcar, obteniendo así una evolución en la publicación de artículos en un período concreto deseado. Además, es posible seleccionar el tipo de documento al que se quiere tener acceso con el fin de realizar una búsqueda más específica.

Documents Authors Affiliations Advanced Search tips ⓘ

Search
self organized criticality × Article title, Abstract, Keywords [v] [+]
E.g., "heart attack" AND stress

Limit [v]

Date range (inclusive)
 Published All years [v] to Present [v]
 Added to Scopus in the last 7 days [v]

Document type
Article [v]

Reset form Search Q

Figura 24- Primera búsqueda realizada con Scopus.

En la primera búsqueda en Scopus, se han usado los criterios de la figura 24, obteniendo un resultado de 1994 artículos en una escala temporal desde 1987 hasta 2017.

En la segunda búsqueda se introdujo la palabra “sandpile” además de “nuclear fusión” con la intención de concretar en la física de plasmas de reactores nucleares, obteniendo un resultado de 4 artículos desde 2001 hasta 2010.

En la tercera búsqueda se tecleó “plasma transport” y “nuclear fusion” con la intención de acotar aún más los artículos con similitudes a este TFG, obteniéndose un resultado de 2.726 artículos desde 1960 hasta el presente.

Como cuarta y última búsqueda se buscó tan solo “plasma transport” y “sandpile”, obteniendo un resultado de 100 artículos entre 1996 y el presente.

Debido a los resultados obtenidos, se decidió que la cuarta y última búsqueda fue la más fructífera en cuanto a número de artículos y acotación al tema del presente TFG, por lo que cabe destacar que es la más señalada de las cuatro realizadas. No obstante, señalar también que la primera búsqueda tiene relevancia, ya que el principio en el que se basa el autómatas está caracterizado en varios artículos pertenecientes a esa búsqueda.

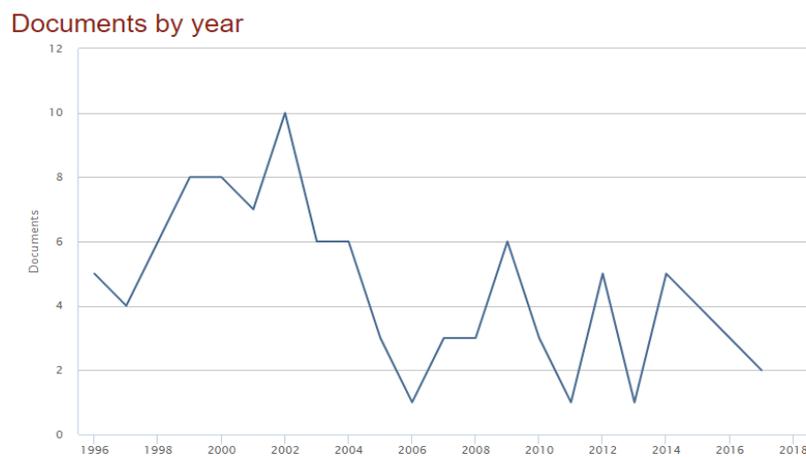


Figura 25- Cantidad de artículos por año usando el cuarto criterio de búsqueda.

El concepto de la criticalidad auto-organizada surgió a finales de los años 80, por lo que no es de extrañar que los primeros artículos relacionados con la fusión nuclear fueran escritos unos 10 años después, tras un período de aceptación e investigación por parte de otras fuentes. Aun viendo el pico del año 2002, año en el que se escribieron 10 artículos, se tomará como muestra representativa del año 2008 en adelante, ya que estos artículos han tomado ideas y conceptos de los primeros artículos, además de mejorar dichos conceptos e incluir nuevos hallazgos. Cabe destacar que este auge en el número de artículos también se debe a la potenciación del proyecto ITER durante esos años. A partir del año 2012 la muestra va perdiendo peso ya que estos nuevos artículos son variaciones y/o calcos de los anteriores por lo que no tienen un peso significativo para la muestra.

Ahora se procederá al análisis de los dos artículos más relevantes elegidos usando los criterios de búsqueda anteriormente comentados.

El primer artículo seleccionado con la cuarta búsqueda es “Characterization of a transition in the transport dynamics of a diffusive sandpile by means of recurrence quantification analysis (RQA)” con ISSN: 24700045. Publicado en 2016, este artículo versa sobre el estudio de la transición dinámica que tiene lugar en una pila de arena usando para ello análisis de cuantificación de recurrencia (RQA en inglés). Dicha transición sucede cuando la combinación de una fuerza motriz, en este caso, la difusividad y el tamaño del volcado excede un valor crítico. Por encima de la transición, el transporte dinámico auto-similar



asociado a la pila de arena clásica (no difusiva) es remplazado por el nuevo transporte dinámico dominado por los eventos de avalancha cercanos y casi periódicos. El contenido determinista de la dinámica de transporte, tal como se cuantifica por RQA, resulta ser bastante diferente en ambas fases. Las series de tiempo analizadas con RQA en este artículo corresponden a flujos de arena locales en diferentes localizaciones radiales a través de la pila de arena difusiva.

El segundo artículo seleccionado con la primera búsqueda es “Self-organized criticality: An explanation of the $1/f$ noise” con ISSN: 00319007 que fue publicado el 27 de julio de 1987, en se da luz sobre los sistemas dinámicos con grados espaciales de libertad que evolucionan naturalmente hacia un punto crítico auto-organizado. El ruido de parpadeo, o ruido $1/f$, se puede identificar con la dinámica del estado crítico. En este artículo también se habla sobre la idea del origen de los objetos fractales. Es de interés comentar este artículo ya que en él se estableció el principio por el que se rige el autómatas para realizar sus simulaciones.

De la búsqueda llevada a cabo para realizar este estudio científico se pueden extraer conclusiones, las cuales serán expuestas a continuación:

- Pese a que Scopus es una base de datos bastante potente, es necesario saber utilizar las keywords adecuadas para optimizar los resultados de la búsqueda, ya que es muy fácil que los resultados que se viertan no tengan demasiada relación. Además, es recomendable acotar la escala temporal de los artículos para encontrar una correlación entre la búsqueda deseada y la obtenida.
- De entre todos los artículos obtenidos con el criterio de búsqueda más preciso, se encontraron similitudes con varios de ellos, en especial con el primer artículo analizado, con el cual comparte varios temas que se tratarán con posterioridad en este trabajo. No obstante, el apartado 5.1 de este TFG aporta luz sobre los perfiles de densidad, ya que es un tema que no aparece en los artículos encontrados con estos criterios de búsqueda.



4. Metodología

En este punto se abordará cómo funciona el autómatas celular utilizado para realizar las simulaciones presentes en este TFG, así como el principio en el que se basa, la criticalidad auto-organizada, y en puntos posteriores los dos canales de funcionamiento que genera el autómatas que son el canal turbulento y el difusivo.

4.1. Criticalidad Auto-Organizada

A lo largo de muchos años se ha intentado crear un modelo capaz de reproducir los fenómenos ocurridos en el transporte observado en plasmas confinados magnéticamente. Se usaron ecuaciones cinéticas y ecuaciones del tipo fluido. Sin embargo, no dieron gran resultado debido a que unas eran muy complejas y en las otras se utilizaban demasiadas aproximaciones por lo que no dieron grandes resultados ni tuvieron gran acogida.

No obstante, a finales de los años 80 surgió una idea que podría explicar y reproducir con mayor exactitud y menor complejidad la dinámica del transporte de plasmas confinados magnéticamente. Esta idea surge de la física de estados fuera del equilibrio, dicha idea es la criticalidad auto-organizada o SOC¹⁹.

Para explicar esta idea, se ha de suponer que se vierte arena de forma lenta, uniforme y grano a grano, desde una posición inalterable, sobre una superficie circular plana. Al comienzo los granos van cayendo y quedando cerca entre ellos. Después, se amontonan unos sobre otros formando una pila cada vez mayor. De vez en cuando, al aumentar la pendiente, en algún lugar se van generando pequeñas avalanchas. Conforme se van vertiendo más y más granos, la pendiente media de la pila se hace mayor, resultando también en un aumento del tamaño medio de las avalanchas y comienzan a escaparse granos de arena del disco. Llegados a un punto, el montón deja de crecer ya que la pendiente ha alcanzado un ángulo bien definido. La cantidad de arena vertida queda equilibrada con la cantidad que se cae del disco. El sistema ha alcanzado el estado crítico. La fricción ya no puede evitar que el choque de un grano con otro realice nuevas colisiones, y que se produzcan reacciones en cadena que generen avalanchas. En esta situación si se vierte un grano de arena a la pila, la cual está en estado crítico, puede producirse de manera impredecible una reacción en cadena que produzca una avalancha de cualquier tamaño, incluso, una de carácter nefasto. Es decir, no hay forma de prever, cuando se vierte un nuevo grano, si se desplazará un pequeño número de granos, se producirá una fuerte avalancha que precipite toda una ladera o se producirá una avalancha de nivel intermedio.

Por otra parte, si el ángulo de la pendiente de la pila es inferior al del valor en el estado crítico, estado subcrítico, las dimensiones de las avalanchas serán menores que las generadas en el estado crítico y la pila subcrítica crecerá hasta conseguir el estado crítico.

¹⁹ SOC, Self-Organized Criticality proveniente del inglés.

En cambio, si el ángulo de la pendiente es mayor que el correspondiente al estado crítico, estado supercrítico, las avalanchas serán más grandes que las generadas por el estado crítico.

En conclusión, tanto los apilamientos subcríticos como supercríticos son llevados espontáneamente hacia el estado crítico. Por lo tanto, el sistema tiende permanentemente al estado crítico, al que regresa después de cada avalancha. Y eso es lo que se entiende por criticalidad auto-organizada.



Figura 26- Criticalidad auto-organizada en una pila de arena.

Fuente: https://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=PMC4171833_fnsys-08-00166-g0002&req=4

4.2. Principio del sandpile como autómatas celular

Para realizar las simulaciones que aparecen en este TFG se usa un autómatas celular, que es un modelo matemático para un sistema dinámico compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados o valores evolucionando en pasos discretos, es decir, los valores se cuantifican con valores enteros a intervalos regulares.

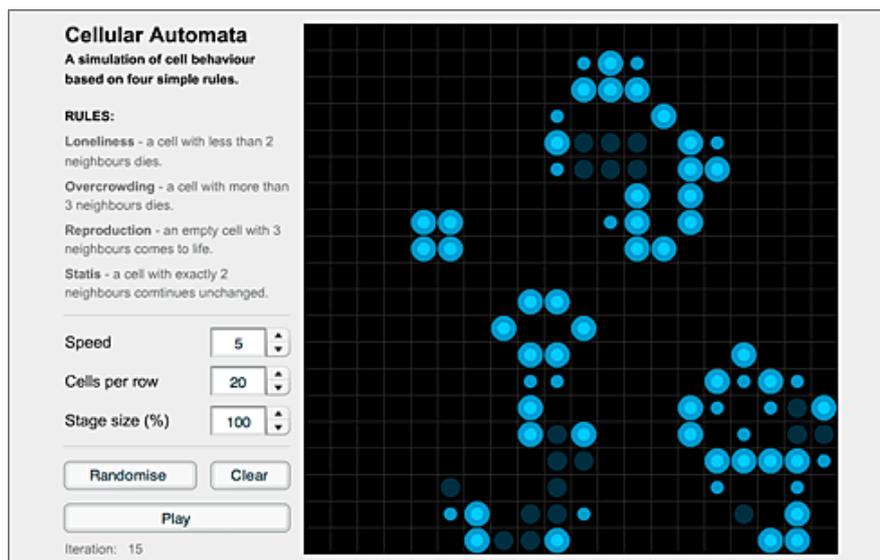


Figura 27- Ejemplo de un autómatas celular simple y unidimensional.

Fuente: <http://www.microsiervos.com/images/cellular-automata.png>

El autómatas usado se llama sandpile²⁰ y asemeja una pila de arena con el transporte de partículas y energía de un plasma en un reactor de fusión confinado magnéticamente. Eso sí, para ello se requieren unas modificaciones para que dicho código albergue elementos físicos que tienen un papel en dicho tipo de plasma, dando así un mejor entendimiento de la dinámica que gobierna el transporte de partículas y energía en este plasma.

Porque como ya se sabe, en este tipo de plasma el sistema permanece fuera de su armonía debido a un aporte de energía externo, en este caso la energía necesaria para calentar el plasma. Pero, a su vez el propio sistema posee la habilidad para reordenar internamente esa energía en una escala de tiempos mucho más veloz que aquella en la que se la aporta, resultando en un estado auto-similar²¹, en el cual, el transporte se puede dar en todas las escalas.

En el caso dado, la pila de arena está compuesta por un número de celdas N , todas ellas de igual anchura y de una altura definida h . Sobre estas celdas se vierte una cantidad fija de granos U_0 con una probabilidad preestablecida P_0 . Cuando la diferencia de altura entre dos celdas consecutivas supera un determinado valor crítico Z_c , se generan avalanchas.

En caso de que, debido a esta decantación de granos de arena, la siguiente celda se vuelva inestable, comienza una avalancha. Y así, continuamente, el tamaño de las avalanchas puede ir desde una celda hasta todo el tamaño de la pila.

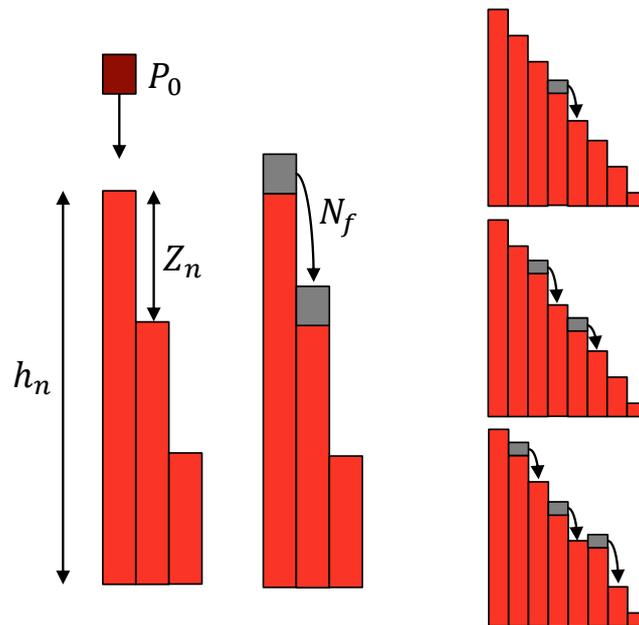


Figura 28-- Normas que regulan la dinámica del sandpile.
Fuente: Elaboración propia

²⁰ Del inglés, pila de arena o montón de arena.

²¹ La auto-similaridad es la propiedad de un objeto (llamado *objeto auto-similar*) en el que el todo es exacta o aproximadamente similar a una parte de sí mismo. Por ejemplo, cuando el todo tiene la misma forma que una o varias de sus partes. Muchos objetos del mundo real, como las costas marítimas, son estadísticamente auto-similares: partes de ella muestran las mismas propiedades estadísticas en diversas escalas.



Una vez el sistema alcanza un estado estacionario, paulatinamente la pila expulsa por su borde una cantidad de granos de arena pareja al número de granos que se han volcado sobre ella en cada instante de tiempo. A este estado se lo conoce por SOC, cuestión que se estudió con anterioridad en este TFG, ya que el transporte turbulento o por avalanchas está presente sin que predomine una escala característica, es decir, avalanchas de los tamaños juegan un papel en dicho sistema.

4.3. Sandpile difusivo

En el sandpile no solo hay transporte turbulento, sino que también lo hay difusivo, basta con añadir una pequeña línea al autómeta para que esto suceda. De este modo, en cada iteración, existe un traslado de arena de una celda a la siguiente, que es proporcional a la diferencia de gradientes entre ambas celdas como se pueda apreciar en la siguiente ecuación:

$$\Gamma = D_0(Z_{k+1} - Z_k),$$

donde Γ es el flujo de partículas, D_0 el coeficiente de difusión y $Z_k = h_{k+1} - h_k$ la pendiente local del sandpile, es decir, la diferencia de altura entre celdas contiguas.

La convivencia de estos dos mecanismos de transporte conlleva a que exista una exuberante dinámica, como se podrá apreciar en capítulos posteriores. De este modo, es bien sabido que investigar los efectos de la interacción entre la turbulencia y la difusión, es de gran utilidad pues, es bien sabido que juega un papel de reconocido valor en los plasmas confinados magnéticamente.



5. Descripción de los datos del estudio

En este apartado, formado a su vez por tres subapartados, se detallarán los resultados obtenidos al realizar las simulaciones pertenecientes a este TFG, para finalmente escribir unas conclusiones sobre las mismas.

5.1. Comparativa entre los perfiles de densidad analíticos y numéricos

Los perfiles de densidad facilitan una información importante sobre las condiciones para la fusión nuclear. Como antes se comentó, la densidad es uno de los factores descritos en el criterio de Lawson necesario para que se produzca la reacción de fusión nuclear, es por ello que en este apartado se describirán gráficas extraídas de simulaciones en distintas condiciones con el fin de arrojar un poco más de luz sobre este tema.

El sandpile difusivo llegará a un estado estacionario bajo la influencia de un “drive” compuesto por la lluvia de arena, que es la fuente de nuestro sistema. Suponiendo que esta fuente sea espacialmente uniforme, el dominio del sandpile se divide en dos subdominios, claramente diferenciados. En el subdominio externo (que se extiende hacia adentro desde la celda límite situada en $x = L$), el transporte de partículas de arena se produce tanto por difusión como por avalanchas. Ambos subdominios coinciden en el punto de transición x_t , cuya existencia establece un valor límite para el parámetro D_0 , según el cual ya no existirá transporte por avalanchas y todo él sería debido únicamente al efecto de la difusión. El punto de transición puede obtenerse sin más encontrar la posición más externa a la que la fuente integrada en el rango $[0, x_t]$ puede ser enteramente evacuada por difusión, suponiendo un gradiente promedio, Z_a , que será siempre ligeramente menor que el crítico, Z_c . La estimación para $Z_a = Z_c - N_f/2$ se deduce inspeccionando la Fig. 29.

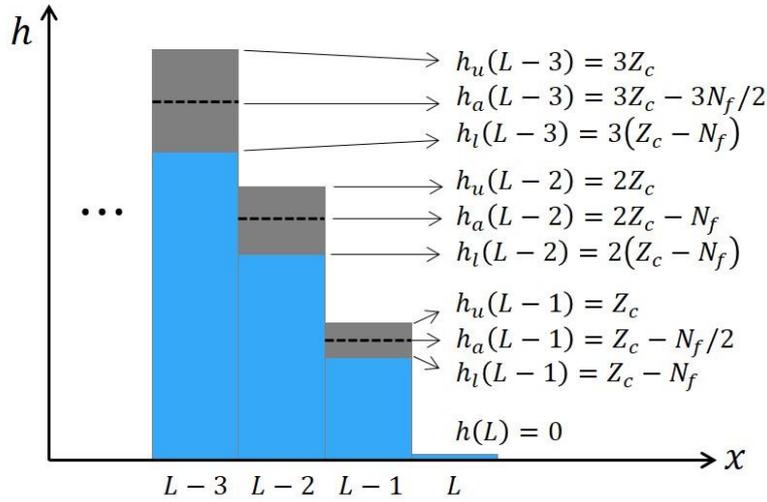


Figura 29- Esquema con los posibles valores para la altura h de las cuatro últimas celdas del sandpile (caso $D_0/P_0 = 0$). h_u, h_a y h_l son los valores máximo, medio y mínimo para la altura de la celda respectivamente. $h(x = L) = 0$ es la condición de contorno para la última celda. Fuente: *Physical Review E*, **94** 022128 (2016).

El resultado es,

$$\int_0^{x_t} S_0 dx = P_0 x_t \rightarrow x_t = D_0 Z_a / P_0. \quad (10)$$

El valor analítico previamente calculado para Z_a y x_t están en acuerdo con las simulaciones. Las soluciones estacionarias para los perfiles del sandpile en los subdominios previamente aludidos son,

$$n(x) = Ax^2 + B, \quad 1 \leq x \leq x_t < L, \quad (11a)$$

$$n(x) = Z_a(L - x), \quad x_t \leq x < L, \quad (11b)$$

con

$$A = -\frac{P_0}{2D_0}, \quad (12a)$$

$$B = Z_a L - \frac{Z_a^2 D_0}{2P_0}. \quad (12b)$$

La condición $x_t < L$ se traslada, en términos de los parámetros de la simulación, a la condición $D_0/P_0 < L/Z_a$, que establece un límite superior para la razón de difusión D_0/P_0 . En los casos en que $D_0/P_0 \geq L/Z_a$, el perfil de densidad será parabólico en todo el dominio radial y no se producirán fenómenos de transporte por avalanchas, siendo solamente producido por difusión. El punto de transición dado por la Ec. (10) se mueve hacia fuera (dentro) para valores crecientes (decrecientes) de la difusividad (D_0) o para valores decrecientes (crecientes) de la fuente (P_0). Además, la cantidad $D_0 Z_a / P_0 L = x_t / L$ representa la fracción del transporte total promedio que abandona el sandpile a través del canal difusivo. Por tanto, la razón promedio de las intensidades de ambos canales puede ser controlada variando D_0/P_0 , una vez fijados los valores de Z_a y L .

En la Fig. 30 se representan los perfiles de densidad para dos casos en los que se varía la difusividad sobre el perfil, D_0 . Se aprecia que cuando $D_0 = 0$, se obtienen perfiles en forma de recta cuya pendiente promedio en estado estacionario (Z_a) es, tal y como era de esperar, ligeramente inferior a la crítica (Z_c). Concretamente, la pendiente promedio es $Z_a = Z_c - N_f/2 = 200 - 30/2 = 74000/400 = 185$, tal y como se comprueba viendo las líneas azules. En cambio, al introducir una difusividad sobre el perfil, se obtienen soluciones con dos subdominios, uno en forma parabólica, y el otro en forma de recta (líneas rojas). Se observa también cómo en ambos casos, para valores de $x \geq x_t$, ambos perfiles son coincidentes.

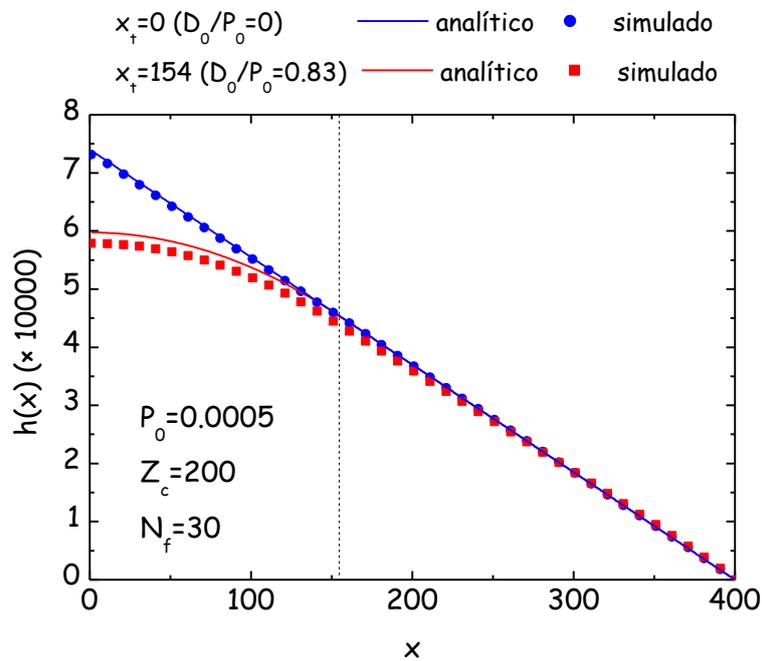


Figura 30— Perfiles de densidad en estado estacionario para dos casos con diferente valor de la razón de difusión D_0/P_0 . En uno (azul), no existe difusión, por lo que el perfil es una línea recta. En otro (rojo), sí hay difusión, por lo que aparece un punto de transición (para este caso particular resulta $x_t = 154$). En ambos casos, se han superpuesto los resultados analíticos (líneas continuas) junto con los obtenidos del autómata celular (puntos).

5.2 Estudio de los flujos radiales de partículas

Otra cantidad de interés para el sandpile difusivo es el flujo local instantáneo de arena, que debe ser entendido como la suma de dos contribuciones,

$$\Gamma(x, t) = \Gamma_t(x, t) + \Gamma_d(x, t), \quad (13)$$

donde $\Gamma_t(x, t)$ representa el flujo turbulento o por avalanchas y $\Gamma_d(x, t)$ el flujo difusivo.

En la Fig. 30 se muestran dos ejemplos de señales de flujo de partículas de arena en el sandpile difusivo. Los parámetros utilizados en ese caso fueron $L = 400$, $P_0 = 5 \times 10^{-4}$, $Z_c = 200$ y $N_f = 30$. La diferencia entre ambas gráficas es la localización de las celdas en las que se calculan los flujos. Así, en la Fig. 30(a), la celda está situada en una zona tal que $x > x_t$. La dinámica de transporte en este caso es tipo SOC, ya que el origen del transporte son las avalanchas que se generan. Así, los eventos locales de transporte generan señales temporales de flujo que presentan estadísticas en forma de leyes de potencia, con memoria en escalas temporales muy grandes.

En cambio, en la Fig. 30(b), la celda está situada en una zona a la izquierda del punto de transición, $x < x_t$ (zona en la que el transporte es generado únicamente por difusión). Por tanto, la dinámica de transporte obviamente será difusiva. En este caso, las señales temporales de flujo presentan estadísticas de Poisson, y los procesos no presentan memoria en escalas temporales grandes. Las señales temporales son asimilables a un ruido blanco.

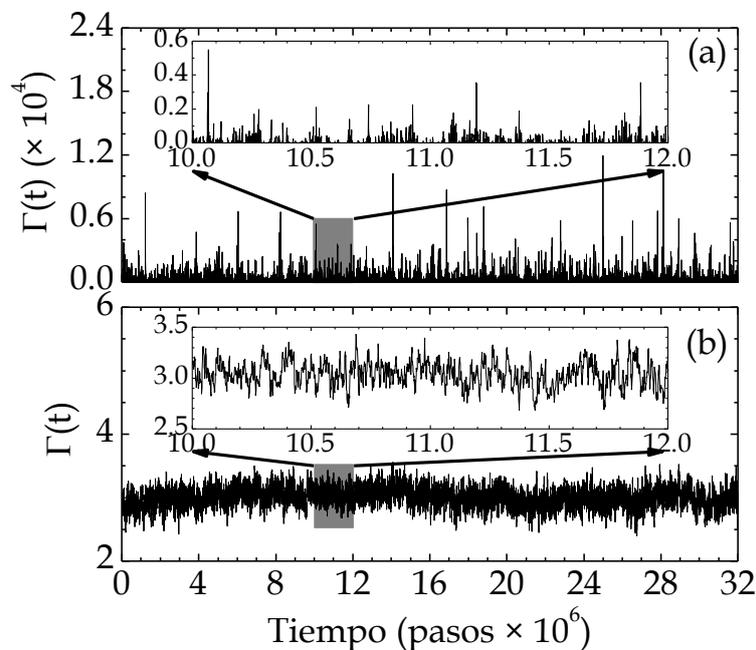


Figura 31— Registros temporales de $\Gamma(x, t)$ en dos zonas a la derecha (a) y a la izquierda (b) del punto de transición x_t . Los insets incluidos son zooms de las zonas sombreadas en las gráficas principales.



5.3 Estudio de las trayectorias y tiempos de confinamiento de partículas trazadoras en el sandpile

Uno de los principales escollos a la hora de conseguir obtener energía a través de la fusión de núcleos atómicos ligeros, es el llamado tiempo de confinamiento de las partículas que componen el combustible en estado de plasma. Y es que, según el criterio de Lawson, se necesita que el triple producto $nT\tau_c$ adquiera un valor suficientemente alto como para que el proceso sea eficiente desde el punto de vista energético. Por tanto, fijados densidad (n) y temperatura (T), el tiempo de confinamiento de las partículas (τ_c) se convierte en un parámetro fundamental a la hora de conseguir que los procesos de fusión sean viables. Básicamente, el tiempo de confinamiento de las partículas es el tiempo promedio que emplean en escapar del plasma debido a los distintos procesos de transporte. De forma análoga, en un sandpile se puede definir el tiempo de confinamiento de las partículas como el tiempo promedio que emplea un grano de arena en abandonar el sandpile, debido a que ha llegado a la última celda de éste. Para ello, se necesita considerar una población diferente de granos de arena que, aunque conviven simultáneamente con la arena normal, son inertes en el sentido de que no son considerados cuando una celda sea chequeada para comprobar su estabilidad. En otras palabras, ninguna de estas partículas trazadoras será considerada a la hora de actualizar la altura de cada celda componente del sandpile.

La atención se centra en una franja de grosor N_f en la superficie del sandpile, que es la capa activa sobre la que tiene lugar el movimiento de arena. Se considerarán N partículas o granos de arena marcados, que inicialmente se colocarán cerca de la zona central del sandpile. La evolución temporal de estas partículas trazadoras servirá para obtener información acerca de sus tiempos de confinamiento y su dependencia con diferentes parámetros que definen el sandpile. La n -ésima partícula marcada será posicionada, en un tiempo inicial t_0^n , en una celda arbitraria i_n , elegida de forma aleatoria de entre un reducido número de ellas, situadas en la zona alta del sandpile (el 10% de las más interiores concretamente). La posición inicial de dicha partícula será por tanto $x^n(0) = i_n$; su profundidad en la celda i_n , medida desde la superficie, será inicialmente $d^n(0) = uN_f$, donde u es un número aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo $[0,1]$. A medida que el sandpile evoluciona, tanto la posición, x_n , como la profundidad, d_n de la partícula marcada cambian. Sus valores en la iteración k -ésima vendrán determinados después de aplicar una de las siguientes reglas:

1. la celda actual es estable y no ha caído ningún grano de arena en la fase de drive; entonces $d^n(k) = d^n(k-1)$; $x^n(k) = x^n(k-1)$;
2. la celda actual es estable, pero N_b (típicamente $N_b = 1$) granos de arena han caído en la fase de drive previa; entonces $d^n(k) = d^n(k-1) + N_b$; $x^n(k) = x^n(k-1)$;
3. la celda actual es estable, pero la celda previa es inestable y mueve N_f granos de arena sobre la celda actual;



entonces $d^n(k) = d^n(k-1) + N_f$; $x^n(k) = x^n(k-1)$;

4. la celda actual es estable, la celda previa es inestable y, en la fase de drive, N_b (típicamente $N_b = 1$) granos de arena han caído en la celda actual;
entonces $d^n(k) = d^n(k-1) + N_f + N_b$; $x^n(k) = x^n(k-1)$;
5. la celda actual es inestable y por tanto N_f granos de arena se mueven a la siguiente celda; no han caído granos de arena en la celda actual en la fase de drive;
entonces, si $d^n(k-1) \leq N_f \rightarrow d^n(k) = uN_f$; $x^n(k) = x^n(k-1) + 1$;
si $d^n(k-1) > N_f \rightarrow d^n(k) = d^n(k-1) - N_f$; $x^n(k) = x^n(k-1)$;
6. la celda actual es inestable y por tanto N_f granos de arena se mueven a la siguiente celda; en la fase de drive, N_b (típicamente $N_b = 1$) granos de arena han caído en la celda actual;
entonces, si $d^n(k-1) \leq N_f - N_b \rightarrow d^n(k) = uN_f$; $x^n(k) = x^n(k-1) + 1$;
si $d^n(k-1) > N_f - N_b \rightarrow d^n(k) = d^n(k-1) - N_f + N_b$; $x^n(k) = x^n(k-1)$;

Básicamente, estas reglas establecen que, cuando haya que mover N_f partículas de una celda (en la que haya una partícula marcada o trazadora) a la siguiente, la partícula marcada será transportada junto con el grupo sólo si su profundidad en la celda es como mucho N_f . En ese caso, la partícula marcada reseteará su profundidad en la nueva celda (la siguiente) a un valor aleatorio entre 0 y N_f . En cambio, si la profundidad a la que se sitúa el grano es mayor que N_f , permanecerá en la misma celda.

La Fig. 31 muestra el movimiento a través del sandpile (tamaño $L = 10000$, pendiente crítica $Z_c = 200$, tamaño de volcado $N_f = 30$ y probabilidad de lluvia $P_0 = 5 \times 10^{-5}$) de tres partículas trazadoras para el primer millón de iteraciones. Como puede apreciarse, los granos alternan desplazamientos radiales (cuando se ven involucrados en avalanchas) que aparecen como líneas prácticamente horizontales (de hecho, no son exactamente horizontales puesto que las partículas avanzan, como mucho, una posición por iteración). Sin embargo, la escala del eje temporal utilizado en la figura hace que parezcan horizontales, con periodos en los que se encuentran en reposo (atrapadas en la misma celda) que se manifiesta en forma de líneas verticales.

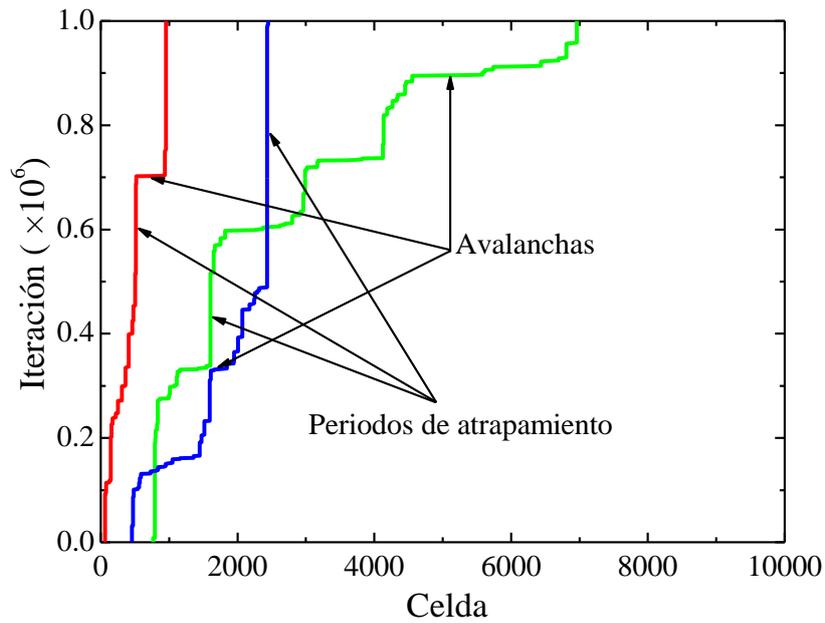


Figura 32— Movimiento a través del sandpile de 3 partículas trazadoras, con posiciones iniciales elegidas de forma aleatoria dentro del 10% de las celdas más internas. Los segmentos verticales se corresponden con periodos en los que la partícula permanece en reposo en una celda. Los segmentos (casi) horizontales se corresponden con periodos en los que la partícula es transportada radialmente, a través de avalanchas.

Con el objetivo de estudiar el transporte en el sandpile desde una perspectiva global, resulta útil calcular el tiempo de tránsito de las partículas, esto es, el tiempo que emplea cada partícula trazadora para desplazarse radialmente a través del sandpile. Así, promediando todos estos tiempos de tránsito sobre un número suficientemente grande de partículas, se podrá estimar el tiempo de confinamiento global τ_c . La Fig. 32 muestra el escalado del tiempo de confinamiento frente a la probabilidad de lluvia, P_0 . Claramente, se puede comprobar, mediante un ajuste lineal, cómo el tiempo de confinamiento de las partículas es inversamente proporcional a P_0 .

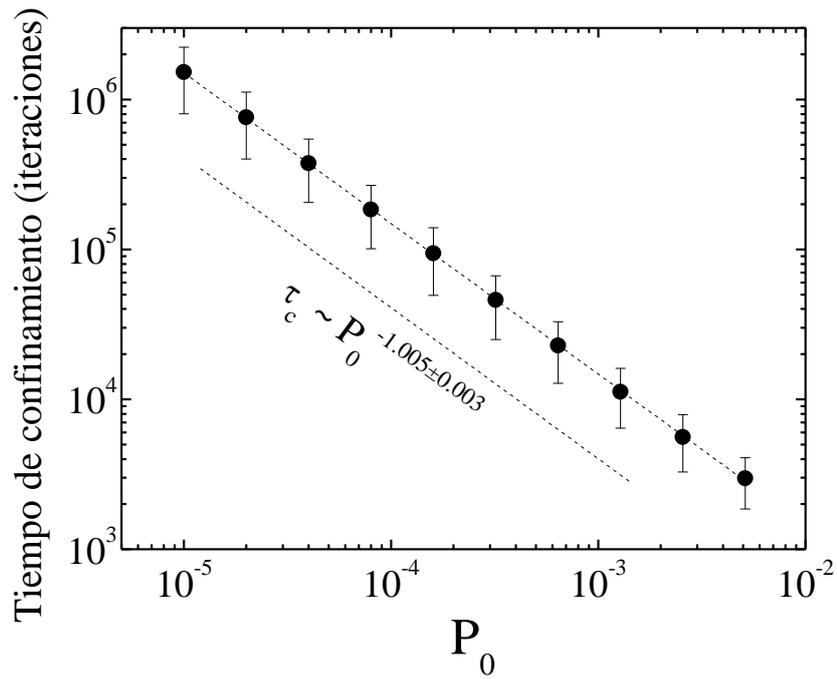


Figura 33— Dependencia del tiempo de confinamiento de las partículas trazadoras, τ_c , con P_0 . Los parámetros de las simulaciones fueron $L = 400$, pendiente crítica $Z_c = 20$, tamaño de volcado $N_f = 4$.



6. Conclusiones

La construcción y el desarrollo de un reactor de fusión de carácter comercial está todavía lejos de ser alcanzado, proyectos como el ITER y DEMO acercan aún más a la sociedad la obtención de energía a partir de la fusión nuclear. No obstante, no hay que olvidar que, para ello, aún hay que pasar varios escollos, para los cuáles no existe una solución concisa y definitiva.

En ese contexto, el presente TFG se ha centrado básicamente en el estudio, a través de simulaciones con un autómatas celular de un sandpile, de dos parámetros básicos como son la densidad de arena y el tiempo de confinamiento de los granos de arena. Para ello, se ha realizado un seguimiento de las trayectorias radiales de los granos. Todo ello en el contexto del conocido “criterio de Lawson”, que establece las condiciones que ha de cumplir un plasma para poder producir energía mediante fusión nuclear de forma eficiente. Cabe destacar que las simulaciones demuestran de forma cualitativa varios de los comportamientos observados en diferentes experimentos anteriores.

Respecto al estudio realizado con los perfiles de densidad, es reseñable que muestran a las claras la diferencia entre dos subdominios espaciales, en función de la predominancia del tipo de transporte de partículas. Así, se observa una zona en el perfil con forma parabólica, en la que el transporte es puramente difusivo, y otra lineal, en la que predomina el transporte por avalanchas (turbulento). La interrelación entre ambos mecanismos de transporte genera dinámicas y fenómenos complejos, que no se pueden explicar atendiendo únicamente a las reglas de transporte individual del autómatas. A partir del análisis de los perfiles de densidad, se encuentra el punto de transición, x_t , entre los subdominios anteriormente citados. A medida que aumenta la difusividad (D_0) o que disminuye la probabilidad de la lluvia aleatoria (P_0), dicho punto se mueve hacia afuera, dado que el valor de x_t es directamente proporcional a D_0 e inversamente proporcional a P_0 . Se concluye por tanto que, una vez fijadas las condiciones de contorno, las intensidades relativas de los canales de transporte difusivo y turbulento pueden ser controladas mediante los parámetros D_0 y P_0 .

Gracias a los estudios de los flujos radiales, se puede caracterizar la dinámica del transporte a cada lado del punto de transición, x_t , señalando que en la zona interior el transporte es puramente difusivo y los procesos no presentan memoria en escalas temporales grandes. En cambio, en la zona más exterior, el transporte es debido, en gran medida, a las avalanchas (turbulencia). Este tipo de procesos sí que posee memoria en escalas temporales relativamente grandes.

En cuanto al tiempo de confinamiento global en el sandpile, se ha de puntualizar que una vez promediado el tiempo de tránsito de las partículas trazadoras, se observa que es inversamente proporcional a la probabilidad de la lluvia, P_0 , debido a que a mayor P_0 es más probable que ocurra lluvia de arena en una celda determinada, ocasionando que se produzca un volcado de una celda situada en la posición x , a la contigua situada en la posición $x + 1$. Esto tiene como consecuencia la generación de avalanchas, que no es más



que un mecanismo de redistribución de energía que expulsa partículas al exterior, para compensar la fuente ininterrumpida que proporciona la lluvia aleatoria.

Pese a que la física de plasmas es una rama muy complicada dentro de la física, gracias al presente trabajo y otros de similares características se arroja algo más de luz sobre los problemas mencionados anteriormente, que tienen que ver básicamente con el control del transporte de las partículas que conforman estos plasmas a la hora de conseguir obtener energía mediante procesos de fusión nuclear. Proyectos como ITER y posteriores tratarán de dar soluciones a todo esto. Gracias a ello, será posible estar más cerca de un futuro con una fuente de energía limpia con el medio ambiente (sostenible), segura y duradera.



7. Apéndice 1

Esquema del código (fortran) utilizado para realizar las simulaciones del sandpile:

```
DO WHILE ( time <= niter )
  time=time+1
  hp=h
  DO i=1,ncells
    CALL random_number(xran)
    IF ( xran < p0 ) THEN
      h(i)=h(i)+u0
    ENDIF
    h(i)=hp(i)+d0*(hp(i+1)-2*hp(i)+hp(i-1))
  ENDDO
  DO i=1,ncells
    CALL random_number(xran)
    IF ( xran < p0 ) THEN
      h(i)=h(i)+u0
    ENDIF
  ENDDO
  hp=h
  DO i=1,ncells
    IF ( hp(i)-hp(i+1) > zc ) THEN
      h(i)=h(i)-nf
      h(i+1)=h(i+1)+nf
    ENDIF
  ENDDO
  h(0)=h(1)
  h(ncells+1)=0.
  .
  .
  .
```



8. Bibliografía

8.1. Bibliografía

- Paul A. Tipler (1991). “*Física. Tomo II.*” Editorial Reverte. ISBN 84-291-43572.
- Golston, R. J. y Rutherford, P. H. (1995). “*Introduction to Plasma Physics*”, IOP Publishing Ltd.
- G. McCracken, P. Stott (2005) “*Fusion, the energy of the universe*”, Elsevier Inc.
- J. M. Greene y J. L. Johnson (1968) “*Plasma Physics*”.
- Boyd, T.J.M., J.J. Sanderson (1969) “*Plasma Dynamics*” Thomas Nelson and Sons Ltd, London.
- T.J. Dolan (1980) “*Fusion research. Principles, experiments and technology*”. Pergamon Press, New York.
- Chen, F. F. (1984). “*Plasma Physics and Controlled Fusion*”, Volumen 1 Plenum Press.
- Alejaldre, C., Alonso, J. J. y Botija, J. (1990). “*Fusion Technology*”.
- J. Raeder et al (1986) “*Controlled nuclear fusion. Fundamentals of its utilization for energy supply*”. Wiley & Son, New York.
- K. Miyamoto (1987) “*Plasma Physics for Nuclear Fusion*”, MIT Press
- Kenneth S. Krane (1988). “*Introductory nuclear physics.*” John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-80553-X.
- Federico Goded Echeverría y Vicente Serradell García (1975). “*Teoría de reactores y elementos de ingeniería nuclear. Tomo I.*” Publicaciones científicas de la JEN. ISBN 84-500-6999-8.
- J. Wesson (1997) “*Tokamaks*” Oxford Science Publications
- Jaime Semprún (2007). “*La Nuclearización del mundo.*” Pepitas de Calabaza, Logroño. ISBN 978-84-935704-5-3.

8.2. Webgrafía

- <http://www.vix.com>
- <http://www.apegr.org>
- <http://www.energiaysociedad.es>
- <https://www.ieee.es>
- <http://www.fundacionenergia.es>
- <https://es.wikipedia.org>
- <http://www.energiza.org>
- <http://www.ideam.gov.com>
- <http://www.foronuclear.org>
- <http://www.areaciencias.com>



- <https://www.csn.es>
- <http://fusionforenergy.europa.eu/>
- <https://www.iter.org/>
- <https://rsef.es/>
- <https://www.ree.es>

8.3. Otros documentos de interés

- F. Albajar “**Radiation Transport Modelling in a Tokamak Plasma: Application to Performance Prediction and Design of Future Machines**” Tesis doctoral, Barcelona junio 2001.
- J. Fontanet “**Simulación de Plasma de Dispositivos de Fusión por Confinamiento Magnético Tipo Tokamak y Stellarator. Validación Experimental y Aplicación al Estudio del Helic Flexible TJ-II**”. Tesis doctoral. Barcelona, Julio 2001.
- Tesis doctoral “**Turbulencia inducida por ondas de deriva en plasmas de fusión. Influencia de la difusión colisional en las propiedades no Markovianas del transporte.**” Autor: José Ángel Mier Maza, Madrid, febrero, 2008.
- Stroth, “**A Comparative Study of Transport in Stellarators and Tokamaks Plasma Physics and Controlled Fusion**” (1998).
- Eduardo Caderón Obaldía “**La ingeniería nuclear y el desarrollo de mecanismos de fusión por confinamiento magnético**”. Revista académica de la Universidad de Costa Rica. Volumen 24, número 1 (2014).
- Artículo “**The critical temperature gradient model of plasma transport: Applications to JET and future tokamaks**”. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research Vol. 2. P.H. Rebut, P.P. Lallia, M.L. Watkins (1989).
- José Manuel Perlado Martín, “**La fusión nuclear como fuente masiva de energía**” La tercera revolución energética y su repercusión en la seguridad y la defensa, septiembre 2010.
- J.A. Mier, R. Sánchez, D.E. Newman. “**Characterization of a transition in the transport dynamics of a diffusive sandpile by means of recurrence quantification analysis (RQA)**” ISSN: 24700045. Physics Review E 94, 2016.
- Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld. “**Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise**” ISSN: 00319007 Physical review letters, Vol. 59 Number 4, 1987.
- D. E. Newman and B. A. Carreras, “**Sandpile dynamics as a paradigm for turbulent transport**”.
- R. Sánchez, B. Ph. van Milligen, J.M.R. Parrondo. “**Complejidad y dinámica de plasmas**” REF, Vol 25-3 (2011).
- B.A. Carreras, V.E. Lynch, D.E Newman “**Anomalous diffusion in a running sandpile model**” Physical Review E, Volumen 60 number 4 (1999)



- B. A. Carreras, R. Sánchez, B. Ph. van Milligen, D.E. Newman “**Criticalidad auto-organizada y el problema del confinamiento magnético de plasmas en dispositivos de fusión termonuclear**”