

DESARROLLO DE SIMULACION NUMERICA PARA FUSION POR CONFINAMIENTO INERCIAL EN EL DENIM

G. VELARDE, J. M. ARAGONES, J. J. HONRUBIA,
J. M. MARTINEZ-VAL, E. MINQUEZ, J. L. OCAÑA
y J. M. PERLADO (*)

La idea de la Fusión por Confinamiento Inercial (FCI) proviene del año 1961, en el que el premio Nobel N.G. Basov (URSS) y J. Nuckols (EEUU) propusieron por caminos diferentes la posibilidad de alcanzar condiciones termonucleares, iluminando pequeñas micropastillas esféricas con luz láser. Años más tarde, EEUU y URSS establecieron programas experimentales a nivel básico que han demostrado su alto potencial como fuente de energía. Al comienzo de la década de los 70, se han unido al empeño los laboratorios de Osaka (Japón), Garching (Alemania), Rutherford (R.U), Limeil (Francia) y Frascati (Italia), emprendiéndose amplios programas de investigación dirigidos a alcanzar en este siglo la factibilidad científica de esta aproximación a la fusión.

LA FCI es un concepto más próximo que la Fusión por Confinamiento Magnético al Confinamiento Gravitacional que ocurre en las estrellas, cuyo descubrimiento condujo a los científicos a considerar las reacciones de fusión como fuente masiva de energía. Sin embargo, la Fusión por Confinamiento Magnético se desarrolló con anterioridad y más rápidamente que la FCI. Una de las razones de este retraso ha sido la dificultad del desarrollo de generadores de haces de luz láser o partículas con potencia suficiente para alcanzar las condiciones de ignición.

En España, nuestro grupo universitario comenzó sus trabajos en este área hace diez años, habiendo enfocado su actividad investigadora en el análisis teórico y la simulación numérica de dichas microbolas y cavidades de reacción.

El punto crítico de la FCI es producir energías mayores que las requeridas para generar los haces de partículas o luz láser. Así pues, han de diseñarse microbolas de alta ganancia de energía, lo cual requiere un estudio detallado del gran rango de posibilidades de las magnitudes que intervienen en la definición de la microbolas. En este sentido, los programas de simulación numérica son esenciales, permitiendo tanto la guía de los experimentos como la interpretación de sus resultados.

PROCESOS FISICOS EN LAS MICROESFERAS FCI

La idea básica de la Fusión por Confinamiento Inercial consiste en alcanzar condiciones termonucleares durante un lapso de tiempo corto (décimas de nanosegundo) en una microbola esférica

de Deuterio-Tritio (DT) con una masa del orden de pocos miligramos. La esencia del proceso es simple y ha sido comparada por Teller (1) con el ciclo de un motor de combustión interna alternativo. En la primera fase, la micropastilla inyectada en la cámara de reacción se comprime mediante luz láser o un haz de iones. La compresión se produce como reacción al proceso de ablación resultante de la rápida e intensa deposición de energía a la microbola. El proceso de compresión rápida o implosión es conducido cuasi isentrópicamente por la generación y propagación de ondas de choque, que, cuando convergen en el centro, dan lugar a un aumento brusco de temperatura (5 Kev) en una pequeña zona central, manteniéndose relativamente frío el resto del combustible. La alta temperatura conseguida en esta zona da lugar al comienzo de las reacciones de fusión, en las cuales son emitidos un neutrón muy energético (14 MeV) y una partícula alfa con menor energía (3,5 MeV). Como consecuencia del pequeño alcance de las partículas alfa emitidas, su contenido energético se deposita en la zona caliente y sus proximidades. Por el contrario, los neutrones interaccionan débilmente con el combustible, despositando sólo una fracción de su energía (20 %) de forma distribuida a lo largo de toda la microbola. La energía depositada por los productos de fusión da lugar a un rápido y gran aumento de la temperatura del combustible y a la propagación de la ignición, esta última en competencia con los mecanismos naturales de transporte de energía (conducción electrónica y radiación) en un plasma sometido a condiciones termonucleares. El quemado del DT se produce mientras se mantiene el confinamiento, lo cual depende de la energía cinética de la capa de empuje, así como de otros complejos procesos que tienen lugar en las fases de ignición y quemado. Por ello, este tipo de confinamiento recibe el calificativo de «inercial», pues éste se mantiene gracias a la inercia de las capas en implosión. Posteriormente, tiene lugar la disgregación de la microbola y la interacción de la radiación, neutrones y partículas cargadas con la cavidad y vasija del reactor.

A la vista de los procesos anteriores, resulta claro que la investigación de reactores FCI puede dividirse en tres áreas que comprenden problemas específicos de cada una de ellas, estando, sin embargo, directamente acopladas.

En primer lugar se encuentra el área relacionada con la generación, transpor-

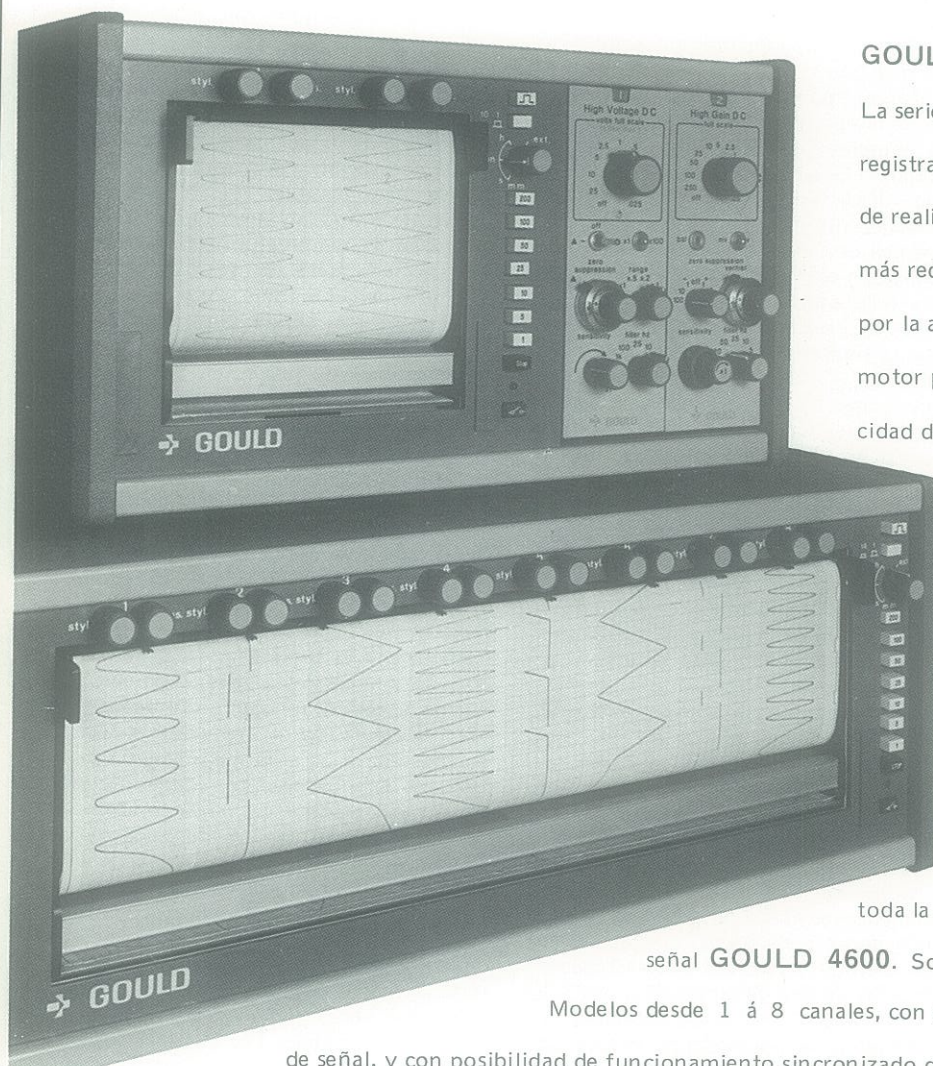
(*) Los autores pertenecen al departamento de Energía Nuclear de la ETSII de la UPM de Madrid.



REGISTRADORES TERMICOS SERIE 8000 S

SELECCIONE LA VELOCIDAD

SELECCIONE LOS MODULOS



GOULD dispone de todo tipo de registradores.

La serie 8000 S responde a la demanda de un registrador galvanométrico, fiable, seguro y capaz de realizar medidas precisas, desde los intervalos más reducidos, a los más largos. Esto es posible por la adopción de un sistema de arrastre mediante motor paso a paso, lo que permite cualquier velocidad desde 1 mm/hora, hasta 200 mm/segundo.

En esta proporción, (1 á 720.000), se puede elegir entre 21 valores preseleccionados, o bien, depender la velocidad de una señal externa. Con independencia de la velocidad, el trazo será siempre nítido y contrastado, debido al sistema de escritura térmica empleado. Los registradores 8000 S son modulares: aceptan

toda la gama de más de 30 acondicionadores de

señal GOULD 4600. Son compactos, ligeros, universales.

Modelos desde 1 á 8 canales, con entrada directa o a través de acondicionador

de señal, y con posibilidad de funcionamiento sincronizado de múltiples registradores, (característica

imprescindible en salas de control).

La Serie 8000 S complementa la gama de registradores GOULD de tinta presurizada.

SOLO PRIMERAS MARCAS EN INSTRUMENTACION ELECTRONICA

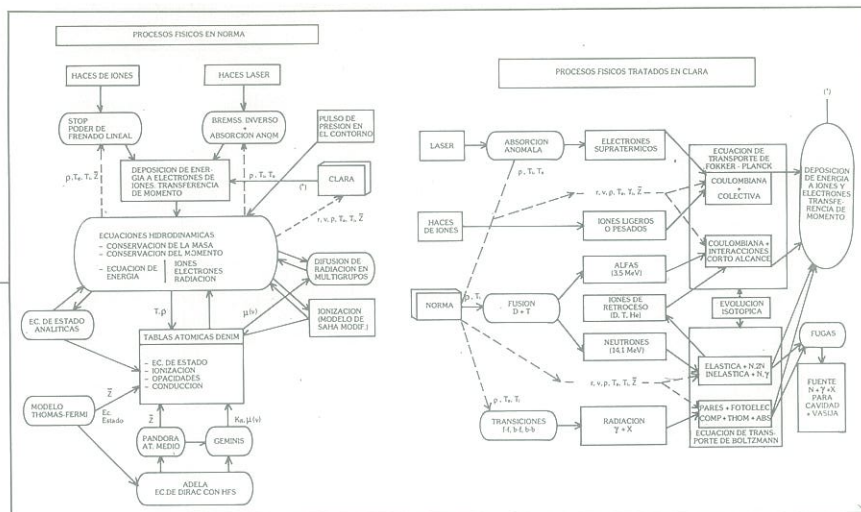


ATAIO* INSTRUMENTOS, S.A.

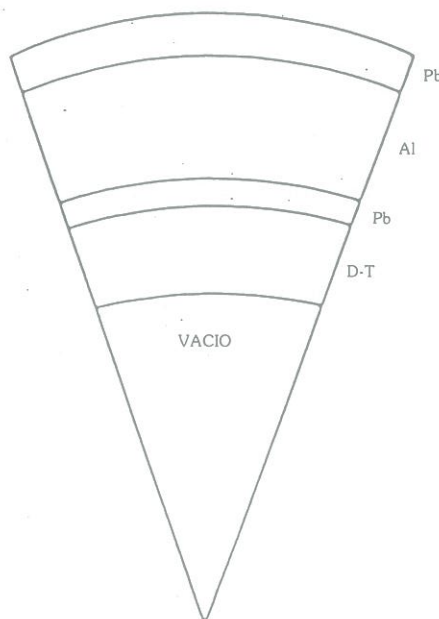
c/. Enrique Larreta, 10. — 28036 - MADRID

Teléf.: (91) 733 05 62 - 733 37 00. Télex: 27249

La tercera área comprende la deposición, transferencia y conversión de energía liberada en la fusión nuclear, que pese a ser tópicos basados en principios físicos y tecnológicos suficientemente conocidos, presentan, no obstante, aspectos específicos de los reactores de fusión, tales como el diseño de la cavidad de reacción, primera pared y envolturas asociadas, tratamiento del tritio y fabri-



Material	Masa (mg.)	Densidad (gr/c.c.)	Radio exterior (cm.)	Átomos X 10^{20}
Pb	100	11.614	0,3	2,91
Al	115	2.707	0,2922	25,65
Pb	15	11.614	0,24553	0,436
DT	2	0,21	0,24382	D 2,4 T 2,4



F II Microbola tipo HIBALL.

plamiento entre los módulos NORMA y CLARA.

La simulación numérica comienza con la interacción del haz de iones o luz láser con la microbola. En el caso del haz de iones, la interacción se describe en términos de la Teoría del Poder Frenado acoplada con la hidrodinámica, considerando en detalle el estado del plasma (densidad, temperatura electrónica e ionización). El aspecto novedoso del frenado de iones en plasmas FCI es la necesidad de considerar tanto las pérdidas de energía de los iones por excitación de modos colectivos (ondas del plasma), como por interacciones binarias (dispersiones elástica e inelástica). En estas últimas intervienen los electrones que permanecen ligados al núcleo, cuyos niveles atómicos pueden cambiar sensiblemente a lo largo del proceso por efectos de compresión (depresión del continuo) e ionización (6). La simulación se realiza por dos vías alternativas recientemente incorporadas en el programa NORCLA. La primera de ellas

(STOP, fig. 1) (7) se basa en la hipótesis de haces perfectamente enfocados, de forma que los iones siguen una trayectoria rectilínea en la dirección radial de la microbola. La segunda consiste en la generalización del modelo anterior con objeto de tener en cuenta el desenfoque de los haces exteriores, de forma que los iones inciden con distintos ángulos en el blanco. La herramienta básica en este modelo es la ecuación de Fokker-Planck, que permite realizar el transporte de los iones con toda generalidad, incluyendo efectos que no son abordables fácilmente con el modelo anterior (8). Una vez resuelta la ecuación del transporte de los iones exteriores, el acoplamiento con las ecuaciones hidrodinámicas se realiza introduciendo en ellas la energía y el momento depositados por los iones en el plasma (fig. 1).

El modelo de interacción láser-plasma se encuentra en un estado preliminar de desarrollo, habiéndose considerado los procesos de absorción colisional y anómala semiempíricamente (9).

Esta limitación junto a otros fenómenos no considerados en la actualidad está siendo mejorada mediante las técnicas de simulación PIC (Particle In Cell) (10), que permiten estudiar en detalle comportamientos complejos del plasma (regímenes turbulentos, saturación de inestabilidades...). Con esta herramienta se espera mejorar sustancialmente a corto plazo tanto el modelo físico anterior, como el de interacción haz de iones-plasma, en el que presumiblemente tengan lugar otros fenómenos colectivos no bien conocidos hasta el momento.

Durante las fases de ignición y quemado, la evolución hidrodinámica de la microbola puede ser tan rápida que las especies del plasma (electrones e iones) no alcancen el equilibrio entre sí. Esta situación de no equilibrio se trata, dividiendo la ecuación, de conservación de la energía en las correspondientes a cada especie, incluyendo los intercambios de energía con las restantes. De la misma forma, en el caso de elevados gradientes de densidad y temperatura con la consiguiente variación de las propiedades ópticas del plasma, ha de considerarse una tercera ecuación de la energía para la radiación, que se encuentra acoplada con la especie electrónica a través del término de intercambio. El resultado final, es la descripción del plasma como un fluido y tres especies (electrones, iones y radiación) en no-equilibrio (3T) (9). Por supuesto, si las condiciones son tales que las especies alcanzan el equilibrio entre ellas, esta descripción se reduce a la correspondiente a dos (iones, electrones + radiación) o a una temperatura.

Cuando la energía transportada por la radiación es importante (fase de ignición), puede emplearse el modelo de difusión de radiación en multigrupos como alternativa al 3T. El grado de aproximación de este modelo es mayor al determinarse las secciones eficaces (opacidades) con dependencia detallada de la frecuencia, permitiendo, por tanto, cálculos sensiblemente más realistas (9). Además, este tipo de descripción es esencial para determinaciones precisas del espectro de radiación térmica emergente de la microbola, que juega un importantísimo papel en la diagnosis de experimentos. Relacionados con la difusión de radiación en multigrupos se encuentran los programas PANDORA, ADELA y GEMINIS que permiten un cálculo detallado de las secciones eficaces (opacidades) a partir de modelos analíticos y numéricos que permiten conocer la compleja estructura atómica del plasma.

Una vez alcanzadas las condiciones de ignición, cuando la energía liberada por fusiones es comparable (~1 %) a la energía interna del combustible (Tionica ~ 2 KeV), el módulo de transporte CLARA comienza los cálculos de relajación de las partículas nacidas en la fusión (n, α), determinando la energía y el momento transferidos al plasma. El

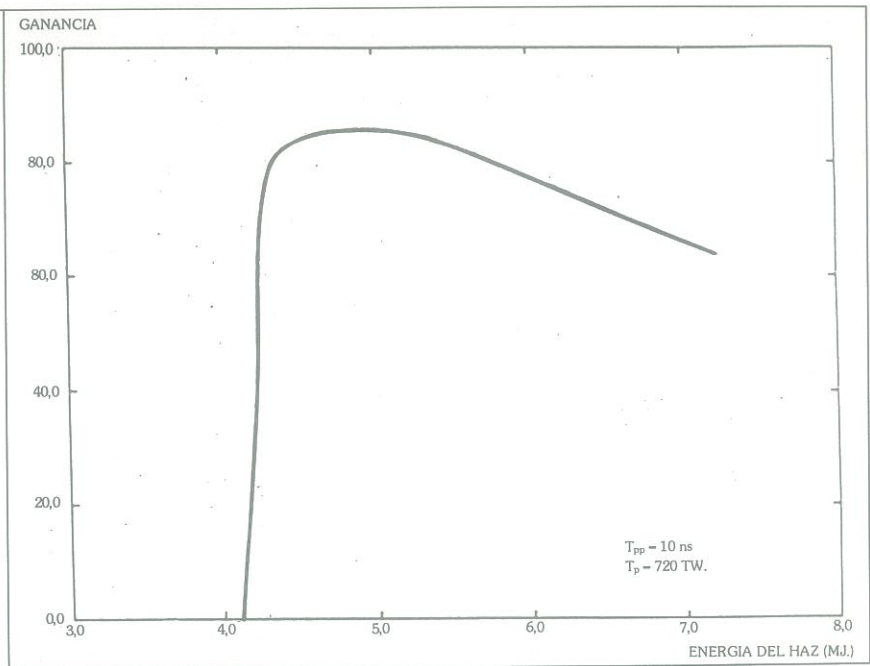
transporte neutrónico, dependiente de la posición, energía, dirección y tiempo, se realiza mediante la ecuación de Boltzmann con las secciones eficaces generadas previamente con el programa NJOY (7), (9). La característica especial del transporte neutrónico en micropastillas FCI, se debe al hecho de que el acoplamiento de las ecuaciones de transporte e hidrodinámicas implica formular las primeras en coordenadas largrangianas, razón por la que han de considerarse términos adicionales con objeto de tener en cuenta el movimiento del plasma (8).

El mecanismo principal de interacción de los neutrones emergentes de fusión con el combustible es la dispersión elástica con los núcleos de Deuterio y Tritio. Como consecuencia de la dispersión, estas especies se separan significativamente del equilibrio, de forma que la distancia que recorren y el tiempo que transcurre hasta que lo alcanzan nuevamente, es comparable con las dimensiones del combustible y con los tiempos de evolución hidrodinámica. La consiguiente deslocalización y retardo temporal en la deposición de energía son efectos importantes, que se consideran en el módulo CLARA, figura 1, introduciendo las fuentes de iones supratérmicos producidos por colisión con neutrones en la ecuación transporte de partículas cargadas.

El transporte de partículas cargadas en las distintas fases de la evolución de la micropastilla (haces de iones, electrones supratérmicos, productos de fusión, Deuterones y Tritones supratérmicos) se realiza con la ecuación de Fokker-Planck, en la que se incluyen un término de Boltzmann para las colisiones cercanas (dispersiones de gran ángulo), y los términos de movimiento del plasma para acoplamiento con las ecuaciones hidrodinámicas (7), (8), (9).

Durante la fase de quemado se calcula la evolución isotópica detallada del combustible, que es importante tanto para determinar la fuente de fusión como para determinar las propiedades de transporte del plasma (secciones eficaces, coeficientes de colisión). Asimismo, tal y como se observa en la figura 1, se dispone de la capacidad adicional para cuantificar la reproducción de Tritio «in situ» mediante isótopos de Li (9).

Los resultados finales del transporte de partículas supratérmicas son: la energía y el momento transferidos, así como las fugas de partículas de la microbola, muy importante para el diseño de la cavidad. El acoplamiento entre los módulos NORMA y CLARA se realiza de una forma iterativa, cuya convergencia se garantiza mediante el examen cuidadoso de las variaciones de potencia depositada en el plasma con el tiempo (3). El proceso iterativo continúa hasta que tiene lugar la disgregación de la microbola.



F III Ganancia de la microexplosión en función de la energía de los haces exteriores, para una microbola hueca multicapa con 2MG de DT.

SIMULACION NUMERICA

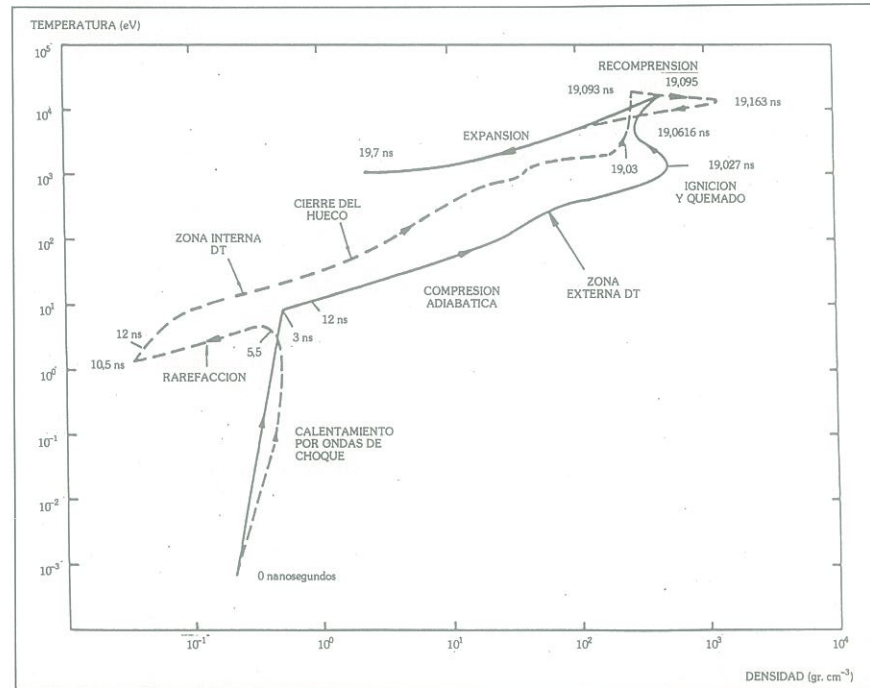
Los modelos de simulación presentados en el apartado anterior se han aplicado a multiples diseños con objeto de validar los métodos numéricos e interpretar los procesos físicos que tienen lugar en la evolución de microbol.

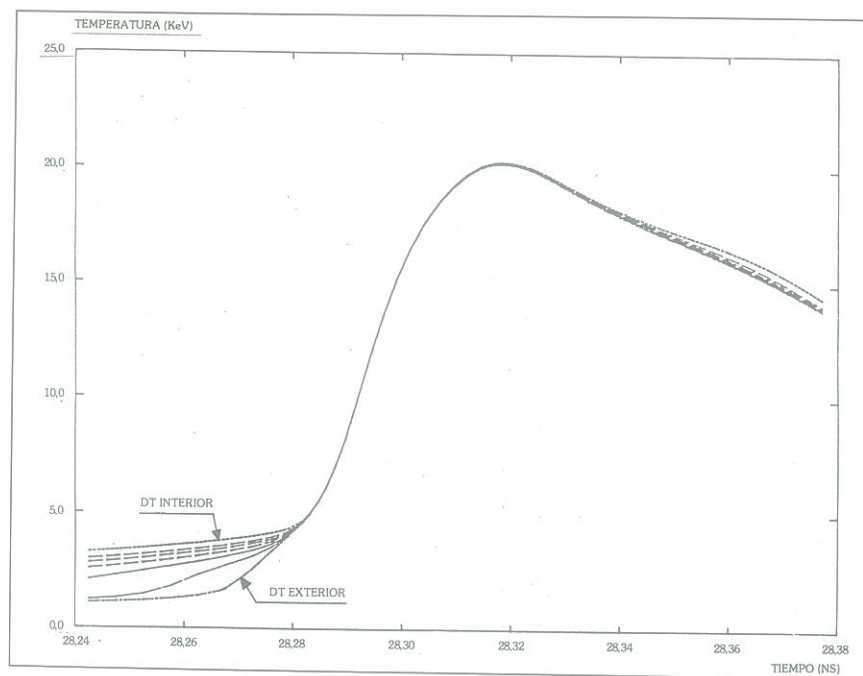
Entre las distintas posibilidades de blancos y haces exteriores, se han seleccionado microbol.

el futuro el estudio de iluminación, tales como la indirecta, que son conceptos prometedores para alcanzar la factibilidad científica. Sin embargo, la elección de microbol.

El tipo de microbola más ampliamente analizado está formado desde el exterior hacia el interior por cuatro capas compuestas de: plomo (exterior), aluminio, plomo (interior) y el combusti-

F IV Evolución T.p de las zonas externa e interna del combustible en una microexplosión característica.





FF Evolución temporal de la temperatura en las distintas capas del combustible.

ble (DT) según se observa en la figura 2. El radio exterior es de 0,3 cm. y la masa de combustible se ha tomado como parámetro comprendido entre 1 y 4 mg. Los resultados que se presentan corresponden al caso de 2 mg. que equivale a una energía de 680 MJ si se alcanza el 100 % de quemado. El plomo interior, segunda capa desde el centro, tiene como misión actuar de blindaje de radiación térmica, evitando el precalentamiento del combustible, el cual disminuye sensiblemente su compresión. Sin embargo, esta capa de plomo puede dar lugar a inestabilidades hidrodinámicas (Rayleigh-Taylor) en la interfase plomo-combustible, degradando el DT y disminuyendo el quemado. Una limitación de la simulación unidimensional consiste en la imposibilidad de estudiar estas inestabilidades hidrodinámicas y simetrías realistas (no esféricas) de la iluminación. Estos estudios podrán realizarse con el modelo bidimensional que se está desarrollando en la actualidad.

Finalmente, el aluminio actúa como capa de ablación, y el plomo exterior como tapón que frena la expansión del aluminio. Las dimensiones de estas capas se determinan de forma que los haces exteriores depositan toda su energía en ellas. Parte de frenado tiene lugar en la capa de plomo exterior y el resto en la zona de ablación.

Uno de los parámetros importantes en la comprensión de la microbola es el perfil del pulso de iones en el tiempo. La tecnología de los aceleradores de iones impone limitaciones sobre este parámetro, sin embargo, la determinación del perfil óptimo impone requisitos adicionales al diseño de los aceleradores específicos de la FCI. En este contexto, y habida cuenta de la carestía y complejidad tecnológica de los aceleradores,

habría que entender la optimización de la FCI como la obtención de ganancias importantes (100) con la mínima energía y potencia del haz.

En los estudios realizados se han considerado pulsos de distintas formas: caja, con y sin prepulso; escalera, exponencial, Gaussianos, etc. Algunos resultados se presentan en la tabla 1. En todos los casos reseñados, incluso con los pulsos simples de caja, se alcanzan condiciones de ignición, con un aumento muy apreciable de temperatura en la parte central. Ello se debe a que la expansión del DT contra el hueco de la microesfera, da lugar a que la compresión de la parte central del combustible transcurra por una adiabática más alta que la correspondiente a la parte exterior. Pese a ello, y como era de esperar, pulsos en forma de caja y sostemalizan el jorres perfiles de densidad y temperatura en el combustible, y, por tanto, a altos quemados y ganancias con moderadas energías del pulso. La razón es que los pulsos en forma de caja isostemalizan el combustible en mayor medida, empeorando la compresión. En general, estos pulsos dan lugar a mayores eficiencias hidrodinámicas (energía interna del combustible/energía del pulso) que pulsos más elaborados, pero la ganancia se reduce debido a la menor compresión del combustible. Esto es consecuencia de que parte de la energía del pulso se invierte en calentar todo el DT en los pulsos en forma de caja, lo cual no es necesario; basta con producir reacciones de fusión en una pequeña zona central de alta temperatura y desde la cual se propague la ignición.

Esta fase de propagación de la ignición, que dura alrededor de 50 ps, parece resultar crítica de cara al éxito o fracaso de la microexplosión FCI. De

realimentarse suficientemente la energía interna del combustible a partir de la energía de los productos de fusión, la temperatura iónica aumentará rápida y sustancialmente, lo que producirá un quemado considerable o, en otros términos, alta ganancia energética. Por el contrario, si a lo largo de esta fase de propagación la realimentación de energía no es suficiente, la microexplosión se extinguirá sin liberación apreciable de energía, y la ganancia será prácticamente nula. Por estas circunstancias cabe hablar de un umbral en la energía del haz, tal como se desprende de la figura 3, en la que se representa la ganancia respecto a dicha magnitud, para un caso de pulso cuadrado de longitud variable, de 720 TW y con un prepulso fijo de 10ns y 2,4 TW. En este contexto habría que subrayar la importancia de los métodos de simulación numérica de FCI, que permiten analizar cuantitativamente multitud de diseños distintos para seleccionar los que ofrezcan menor energía de umbral, variable auténticamente decisoria de cara a la implantación de esta fuente de energía e incluso a la demostración de su viabilidad científica.

El modelo numérico para caracterizar esta fase de propagación ha de reproducir fiablemente los tres mecanismos de transporte de energía que son fundamentales: radiación, neutrones y partículas alfa.

Para densidades del orden de 300 g.cm^{-3} en el DT existe un cambio sustancial de sus propiedades de transporte de energía entre 0,5 y 2,0 KeV. Por debajo del primer valor domina la conducción electrónica, mientras que por encima del segundo es la radiación térmica quien gobierna casi absolutamente dicho transporte.

Esta circunstancia explica la isotermaización alcanzada al final de la fase de ignición, perfectamente observable en las figuras 4 y 5. Al comienzo de la ignición de la fuente de energía se focaliza en el centro, y en el caso de la figura 4 adquiere un valor de unos $40 \text{ MJ.g}^{-1}.\text{ps}^{-1}$. En la periferia, sin embargo, la tasa de fusiones arranca desde valores muchísimo más bajos, aunque el valor medio a lo largo de la ignición termina ascendiendo hasta unos $8 \text{ MJ.g}^{-1}.\text{ps}^{-1}$. En este mismo período, el incremento de energía interna del combustible es de $3 \text{ MJ.g}^{-1}.\text{ps}^{-1}$ en el centro y de 7 en la parte externa.

El papel que juega la radiación en esta fase se ha puesto en evidencia con varios cálculos en los que se ha anulado la efectividad de este mecanismo de transmisión (poniendo a cero su recorrido libre medio). En estos supuestos no se alcanza en absoluto la isotermaización antes mencionada, evolucionando el exterior del combustible mucho más lentamente que el interior. Al final de la propagación, y como resultado de

los enormes gradientes creados por la ausencia (ficticia) de radiación, se originan unas ondas de choque que comprimen violentamente las capas exteriores del combustible contra el plomo, (fig. 6) calentándolas incluso por encima de la temperatura central.

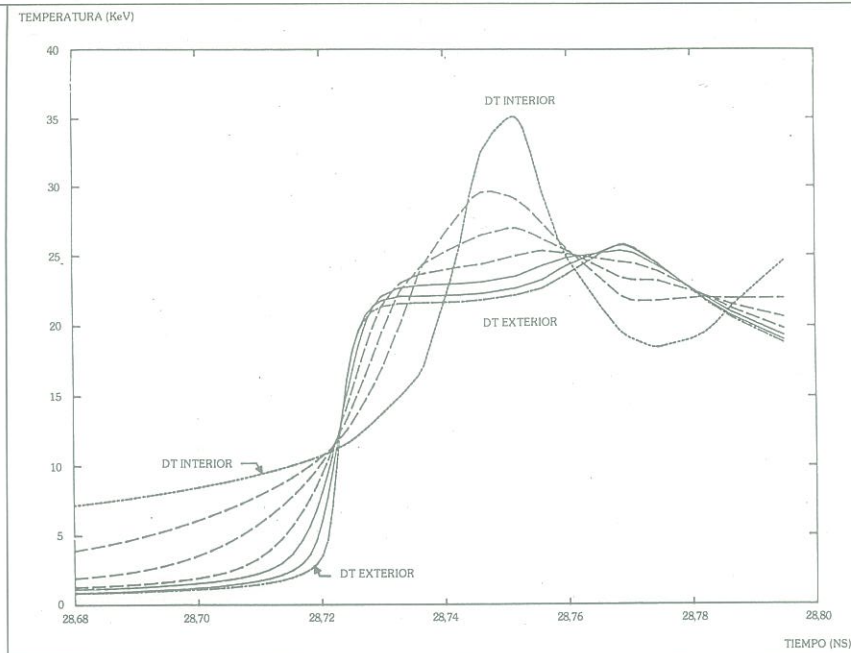
Los neutrones (segundo mecanismo en cuanto a velocidad) juegan también un papel fundamental en la ignición, lo que implica la necesidad de calcular con gran precisión el transporte y la deposición de energía de estas partículas. En la figura 7 se muestra la diferencia en la evolución de la potencia de fusión de un determinado caso con y sin contabilización de la deposición de energía neutrónica en el combustible. Se aprecia que la suposición de que los neutrones escapan completamente del combustible conduce a un error (por exceso) en el umbral de la ignición. Concretamente, el caso de 7ns de pulso (5,05 MJ) produce una ganancia de 86 en el caso real (contabilizando la deposición neutrónica) y una ganancia nula en el supuesto de anular esta deposición (poniendo los kermas o factores de transferencia de energía a cero).

Las partículas alfa ceden prácticamente toda su energía en el combustible, siendo, por tanto, el principal mecanismo de realimentación energética (aunque no el único, como ocurre en la Fusión por Confinamiento Magnético). Algunos métodos de simulación numérica suponen deposición local e instantánea de la energía de estas partículas, dado su reducido rango.

Aunque esta simplificación sea aceptable como primera aproximación y ofrezca resultados aceptables en los casos de ignición sin dificultades, se desarrollaron por este Departamento métodos de cálculo preciso del transporte y la deposición energética de estas partículas. El modelo normalmente usado se basa en la resolución de la ecuación de Fokker-Planck, incorporando incluso el efecto de movimiento del plasma. Este módulo de cálculo se procesa paralelamente al de transporte de neutrones y provee los términos de fuente de energía y momento de las ecuaciones hidrodinámicas que se van resolviendo alternativamente con las precedentes, bien en extrapolación, bien en recálculo y verificación de convergencia.

La simulación correcta del transporte de alfas revela que la evolución de la microbola FCI es un poco más lenta que la obtenida al suponer (erróneamente) deposición local e instantánea. En la figura 8 se expone la cuantificación de dicho retraso, cifrado en unos 5ps para los casos que se están describiendo. Una vez alcanzada la isothermalización al final de la etapa de propagación, la evolución sigue absolutamente paralelos, con el retardo ya aludido.

De poseer el combustible energía interna suficiente para provocar la microexplosión, tal retraso no es crítico.



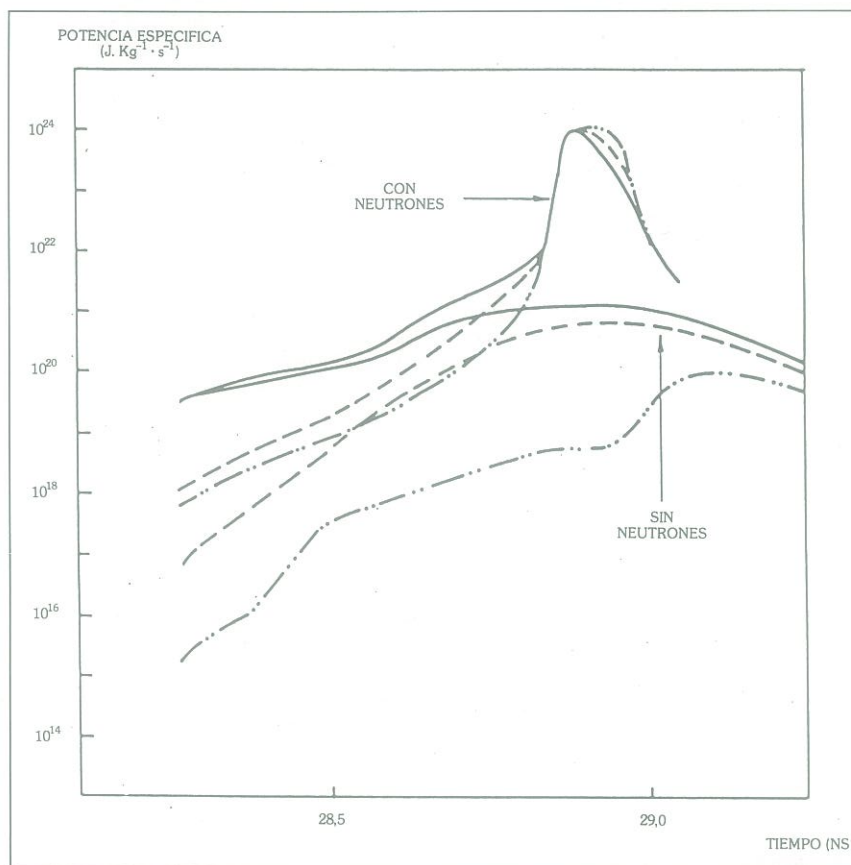
FVI Evolución temporal de la temperatura en las distintas capas del combustible en un caso calculado sin transporte de radiación.

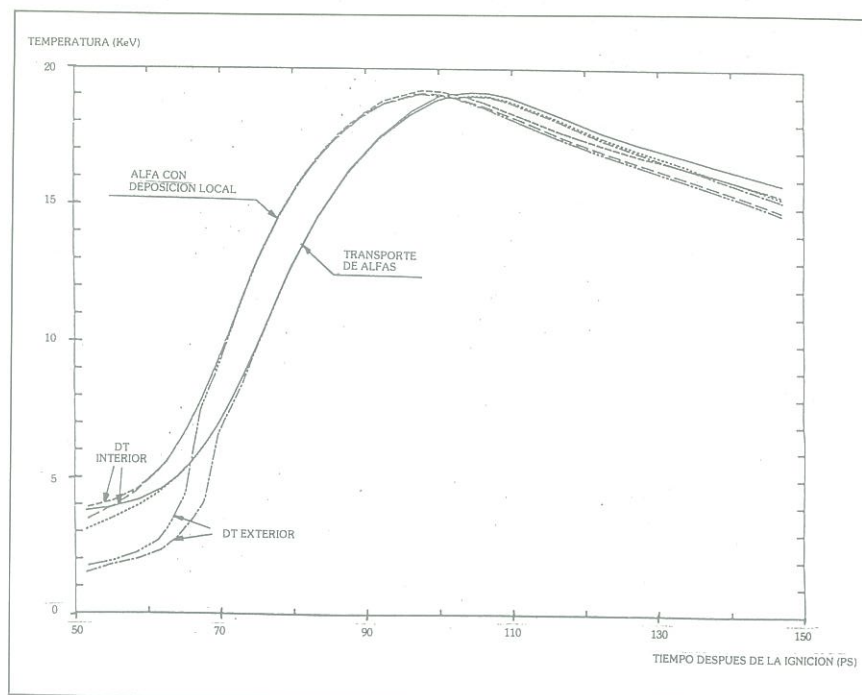
Sin embargo, en los casos próximos (por arriba) al umbral de ignición este retraso y la deslocalización energética que conlleva, pueden provocar fallo de la ignición. De ahí que resulte muy aconsejable la simulación correcta del transporte de estas partículas.

Es importante dejar constancia de las diferencias temporales existentes entre la transmisión de energía por neutrones

y por alfas. Al comienzo de la fase de ignición, cuando sólo en el centro se producen fusiones y la periferia no está a más de 1 KeV, la deposición de energía en esta última zona se debe, en más del 90 %, a los neutrones. Sin embargo, unos 50ps después, cuando la propagación está prácticamente terminada, la deposición por alfas es el doble (aproximadamente) de la neutrónica.

FVII Diferencia de evoluciones de la potencia específica del combustible en un caso real (con deposición de energía por neutrones) y uno ficticio (anulando la deposición).





F VIII Diferencia de la evolución de la temperatura (central y periférica) del combustible en un caso real (con transporte de alfas) y otro ficticio (con deposición local).

Estos números indican la importancia que en las micropastillas FCI tienen los mecanismos rápidos de transmisión de energía: radiación y neutrones. (A estos efectos conviene recordar que la velocidad de los neutrones de 14 MeV es $1/6$ de la luz). Concluida con éxito esta fase de propagación de la ignición, la realimentación energética al combustible es tan fuerte que su temperatura se eleva a decenas de KeV, a lo cual corresponden tasas de fusión muy elevadas.

Durante la fase de quemado se produce un efecto de recompresión del combustible, como puede verse en la figura 4. Este efecto se debe a que los distintos mecanismos de transporte de energía, sobre todo la radiación térmica, producen la ablación hacia el interior de las zonas más internas del plomo. La ablación es consecuencia de la intensa deposición de energía, que produce un aumento de temperatura y de presión que da lugar a una onda de choque que recomprime el combustible, alcanzándose unos espesores máxicos (PR) mayores que los que se consiguen al final de la comprensión hidrodinámica pura.

El quemado del combustible tiene lugar en unos 100 picosegundos, transcurridos los cuales la tasa de fusión es prácticamente despreciable debido al quemado y al desconfinamiento o expansión del combustible. La distribución de energía liberada en un caso típico es:

- Energía de las partículas alfa depositada en el combustible: 20 % del total producido en las fusiones.
- Energía de los neutrones depositada en el combustible: 15,5 %.
- Energía depositada por los neutrones en el plomo interior: 1,1 %.
- Energía de los neutrones y radiación fugada: 63,3 %.

Los estudios realizados con las microbolitas anteriores se están extendiendo en la actualidad a otras configuraciones y otros tipos de iluminación. Por ejemplo, los resultados de la simulación indican una acusada dependencia de la ganancia de energía con la razón de aspecto, definida como el radio exterior de la microesfera dividido por el espesor. Asimismo, los resultados obtenidos con el modelo de interacción haces de iones desenfocados-plasma indican claramente una modificación muy apreciable en los perfiles de deposición de energía conforme aumenta el desenfoco, habiendo, pues, de considerarse en el diseño de microbolitas (8).

VASIJA DE REACTOR DE FCI

Hablar del estudio de la vasija de un reactor de Fusión por Confinamiento Inercial, supone la consideración de cuatro componentes básicos: primera pared, envoltura, reflector y blindaje en torno a la cavidad de reacción. Elemento cuyas características varían profundamente según el concepto global de diseño. No es válido, por lo tanto, imaginarse un único diseño base al que se añaden mejoras como perturbaciones a que está sometida la vasija, han dado lugar a soluciones radicalmente distintas de la misma y, por tanto, de sus componentes.

Al nivel en que se encuentra la investigación sobre estas vasijas de reactores de fusión, se podría pensar en dos perspectivas para aportar contribuciones significativas:

I) Proposición de diseños conceptuales integrados, teniendo en cuenta las

peculiaridades condiciones de irradiación ($1-10\text{Mw/m}^2$) pulsada, haciendo uso de los conocimientos y metodología adquiridos hasta la fecha, esencialmente debidos a otras áreas de la Ingeniería Nuclear.

II) Profundización en aspectos parciales de la vasija sobre algún diseño base, considerando la manera más rigurosa las condiciones de funcionamiento específicas de cada parte, mediante el uso de datos, modelos físicos y funciones respuestas adecuadas a la nueva física que aparece en estos reactores.

En el DENIM se ha seguido fundamentalmente la segunda de las líneas mencionadas.

Muchos son los parámetros que hay que calcular para definir la bondad/viabilidad del diseño propuesto, con la característica de que la evaluación de estas funciones respuesta debe a efectuarse de forma conjunta. Así al hablar de diseño de la primera pared, entendemos la propuesta de materiales que soporten las elevadas cargas térmicas y mecánicas a que estuvieran sometidos además del daño neutrónico asociado a los elevados flujos de neutrones, gammas, partículas cargadas y rayos X; o bien de elementos protectores de la primera superficie estructural que soporten la corriente emergente de la microbota. Dentro de esta segunda concepción puede aparecer como elemento protector la propia envoltura, debiendo cumplir además sus propias funciones de extracción del calor y de producción de tritio. En definitiva, dependiendo del concepto se observa un alto grado de interpenetración entre las funciones de las componentes de la vasija contenedora. Este problema de primera pared ha sido revisado para distintos materiales y condiciones, concluyendo en diferentes propuestas de protección: líquida, húmeda, gaseosa, magnética (12).

Los estudios efectuados hasta la fecha en el DENIM se han centrado en la determinación de los parámetros de envoltura: deposición de energía por neutrones o gammas, tasa de reproducción de tritio y efectos de daño neutrónico medidas por el número de desplazamientos por átomo y producción de fases heterogéneas en la estructura (He, H).

Se han elegido tres diseños base de reactor SOLASE (13), HIBALL (11), CASCADE (14), que contemplan diferentes soluciones de protección de primera pared, haciendo uso de la propia envoltura en los casos de HIBALL y CASCADE y con protección gaseosa y pared de grafito en SOLASE.

Definido el marco de estudio de esta manera, queda para un futuro, ya abordable con los métodos de cálculo del DENIM, la determinación de la deposición de energía por rayos X y partículas cargadas (principales condiciones) en

los sistemas de protección de primera pared, junto a los efectos secundarios de ablación, condicionamiento de la frecuencia de disparo, tensiones estructurales y vibraciones.

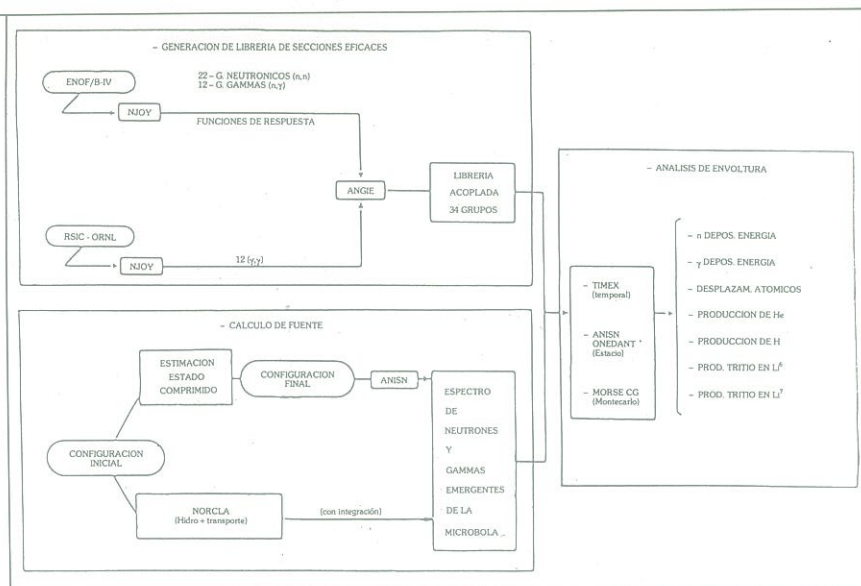
La condición de contorno es la fuente neutrón/gamma emergente de la microbola de DT donde se han producido las reacciones de fusión, previa implosión de la misma por haces de luz láser, o de iones. Existe, pues, una relación profunda entre ambos elementos; microbola y vasija, que se debe definir mediante algún parámetro. Ese ha sido uno de los objetivos del trabajo realizado. En la figura 9 se muestra el esquema de cálculo disponible en el DENIM, abarcando los tres niveles imprescindibles, generación de secciones eficaces, definición de la intensidad y espectro de la fuente neutrón-gamma y, finalmente, los programas estacionarios y temporales de estudio de la envoltura y las funciones estudiadas.

En la determinación de la fuente neutrón-gamma se tienen dos vías: aproximación temporal y estacionaria. Seguir la primera supone el análisis acoplado hidrodinámico - transporte temporal, NORCLA (5), de la implosión y fusión de la microbola, resultando un aspecto que integrado en el tiempo de quemado, daría la fuente espectral deseada. Sin embargo, nuestro objetivo ha sido definir de la forma más adecuada posible el parámetro medio ρR de la microbola, tal que permita una identificación de la misma en un cálculo estacionario, resultando el mismo valor de intensidad y espectro de fuente que en un cálculo temporal completo, mucho más caro y menos flexible para los análisis paramétricos y de perturbaciones. Se ha propuesto una solución (15) que se puede resumir en:

- Densidad del combustible y fuente neutrónica uniformes espacialmente en el cálculo estacionario.
- Definición de la configuración de la microbola estacionaria a través del parámetro ρR ponderado con la variación temporal del quemado de la misma.

Los resultados obtenidos con este parámetro (15) han sido altamente satisfactorios, tanto en la comparación con la aproximación temporal del espectro de fuente, como en los resultados obtenidos para las envolturas, HIBALL y SOLASE, dándose la máxima discrepancia en los desplazamientos por átomo para el concepto SOLASE (1,5 %). Por otra parte, con otras definiciones de ρR dadas en la bibliografía y ampliamente aceptadas, se obtienen diferencias de un 6,5 % en la determinación de fuente, muy superior al obtenido con nuestra propuesta.

En las figuras 10 y 11, se puede observar la variación de las funciones características elegidas para la envoltura como función del valor del parámetro



FIX Método de cálculo.

ρR que define a la microbola/espectro. Están dadas con referencia al caso de no considerar el efecto de la propia microbola sobre el espectro de fusión ($\rho R = 0$). Se observa como la producción de tritio evoluciona de forma diferente para los dos diseños considerados. El ablandamiento del espectro tiene una marcada influencia en el caso del HIBALL mientras que es despreciable en SOLASE. La razón hay que encontrarla en las reacciones $Pb(n,2n)$ que se dan en el eutéctico $Li17Pb83$ usado en HIBALL como extractor de energía y reproductor.

La energía depositada en la envoltura depende principalmente de la energía neutrónica liberada por la microbola. El calentamiento decrece al ablandarse el espectro siendo el efecto ligeramente más significativo en HIBALL que en SOLASE debido a la mayor contribu-

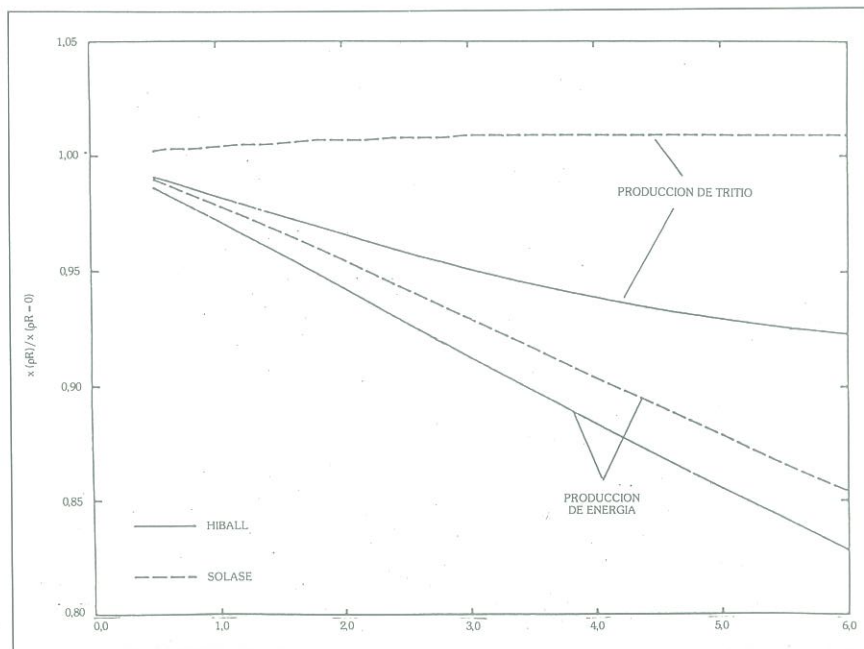
ción relativa de gammas secundarias en HIBALL cuya contribución disminuye con el aumento de ρR .

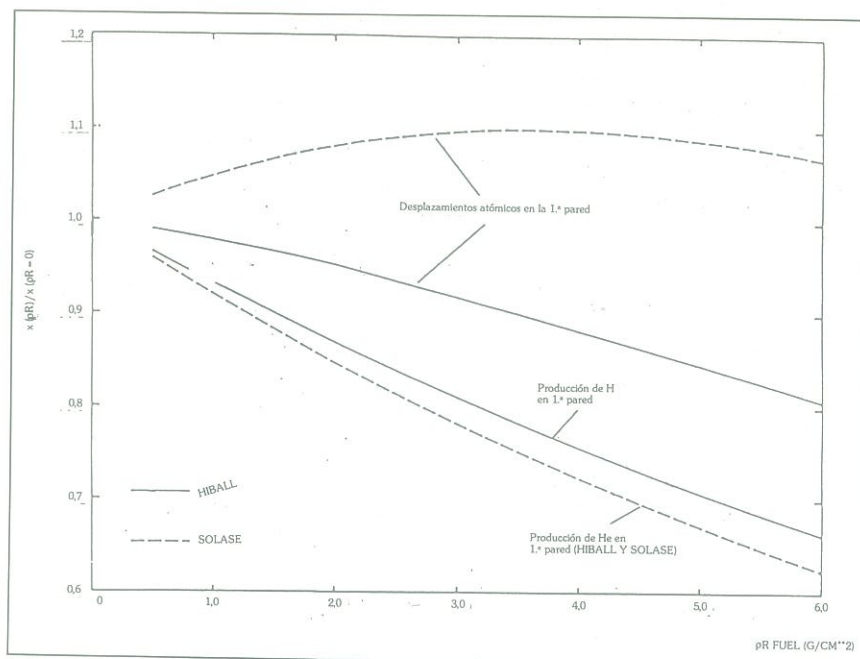
El comportamiento del acero ferrítico (Ht-9, HIBALL) y del grafito (SOLASE) es muy diferente en lo que a desplazamiento por átomo (dpa) se refiere, debido a los diferentes perfiles de las secciones eficaces para ambos materiales. Así la sección eficaz (dpa) para el C^{12} es máxima en 2 MeV, mientras para el hierro el máximo aparece a 14,1 MeV.

La producción total de gas en ambos conceptos es muy diferente, apareciendo heterogeneidad H en HIBALL y siendo la de He muy superior en SOLASE [reacciones (n,α) y $(n,n^3\alpha)$ en C^{12}]. No obstante su sensibilidad respecto al espectro es muy similar.

Los estudios llevados a cabo en el DENIM se han extendido también a la influencia de la fuente gamma y de las

FX Variación de la producción de tritio y deposición de energía en función del parámetro ρR .





FXI Variación de la producción de daño en función del parámetro ρR .

capas no combustibles que componen la microbola (15, 16).

Se han efectuado comparaciones temporales y estacionarias de diferentes conceptos, dando los perfiles espaciales y la evolución con el tiempo de los parámetros ya mencionados (15, 16). El estudio de materiales, sus cargas térmicas y mecánicas bajo las condiciones de irradiación de estos reactores han sido revisadas (17), destacando los aspectos más novedosos y de mayor interés.

Los reactores híbridos de fusión-fisión suponen una alternativa de aprovechamiento de los productos de fusión emergentes de la microexplosión que se da en la cavidad. Y lo son, contemplados bajo su concepto de casos reproductores (fisión suprimida) o como dispositivos multiplicadores de energía que

cumplen su función de generación de material fisil; en cualquier caso, con incidencia en el actual ciclo del combustible nuclear. En el DENIM se ha venido efectuando un trabajo (8, 9) sobre estos diseños, calculando los parámetros integrales de viabilidad con la metodología disponible en el Departamento, obteniendo un sistema base que permitiese estudios futuros. Para ello se han establecido dos modelos de cálculo: estacionario (estudio paramétrico y valores integrales) y temporal (efectos pulsados FCI). La realización de los estudios de sensibilidad del sistema se han enfocado en las siguientes áreas: materiales de primera pared y optimización del sistema (reproductor, extractor) para disminuir el daño, efecto de la magnitud de la zona fisil en la reproducción de tritio, valoración de diferentes refrigerantes y repro-

ductores, comparación de las funciones de respuesta (energía depositada, reproducción fisil, reproducción de tritio, daño neutrónico) para fuentes monoenergéticas y espectrales de fusión, efecto del enriquecimiento de la zona fisil, ventajas e inconvenientes de la fisión suprimida.

Finalmente una mirada hacia el futuro a través del trabajo que se está abordando. Resulta particularmente significativo la escasez metodológica, e incluso de física básica, que existe el estudiar y calcular la influencia que el daño neutrónico (espectro de fusión) tiene en la distorsión de la microestructura y finalmente en la modificación de las principales propiedades mecánicas de los materiales. Y esto se ve aumentado al considerar el efecto temporal. Así aparece como un apasionante campo, combinado con las pocas instalaciones experimentales existentes en el mundo, la profundización en este campo teórico/simulación, junto con el desarrollo de los problemas de primera pared, y amencionados, los más convencionales de diseño/evaluación del blindaje, y la determinación de la activación de materiales.

CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Puesto que las incertidumbres asociadas a los haces de iones o láser y a las vasijas del reactor se espera que sean resueltas en los próximos años, el punto focal de los futuros reactores FCI es conseguir diseños óptimos de microbolas de alta ganancia. Este punto ha sido puesto de manifiesto por la simulación numérica realizada con el programa NORCLA, cuyos resultados indican que con haces exteriores de características razonables y diseños sencillos de microbolas pueden obtenerse altas ganancias. Pese a ello, y en acuerdo con la mayoría de los grupos de investigación, la optimización del concepto FCI implica profundizar más en la comprensión de los fenómenos físicos y en su simulación numérica. En este sentido, la actividad del DENIM en el diseño de microbolas se dirige a realizar análisis paramétricos que permitan establecer con precisión el escenario de los reactores FCI. Este escenario comprende también diseños conceptuales de la vasija y la cavidad de reacción, así como los sistemas de conversión de energía.

La mejora de las herramientas o programas de simulación con objeto de abordar situaciones más realistas implica considerar los efectos de asimetría de la iluminación así como las inestabilidades hidrodinámicas. Para cumplir ambos objetivos se está desarrollando una versión bidimensional del programa NORCLA, centrada esencialmente en la hidrodinámica. La contrapartida de esta versión es la dificultad de incluir con tanto detalle como en el modelo unidi-

TI

Perfil del pulso	Evolución hidrodinámica pura			Idem con reacciones de fusión	
	T_{MAX} (KeV)	$\overline{\rho R_{MAX}}$ (g · cm ⁻²)	η^F (%)	$\overline{\rho R_{rec}}$ (g · cm ⁻²)	Energy Gain
	2,23	3,38	5,27	5,26	64
	2,14	3,37	5,66	5,25	80
	2,00	3,01	6,13	4,73	86
	1,90	2,91	6,41	3,46	80