UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES

**Sistema para frenado de neutrones y
reproducción de tritio en plantas de fusión
nuclear por confinamiento inercial**

TESIS DOCTORAL

Aldo Ariel Fierro Rodríguez

Ingeniero Físico por la Universidad Autónoma Metropolitana y
Máster en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México

2020

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES

**Sistema para frenado de neutrones y
reproducción de tritio en plantas de fusión
nuclear por confinamiento inercial**

Aldo Ariel Fierro Rodríguez

Ingeniero Físico por la Universidad Autónoma Metropolitana y
Máster en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México

Directores de Tesis:

Dr. Antonio Rivera de Mena
Profesor del Departamento de Ingeniería Energética
Universidad Politécnica de Madrid

Dr. Fernando Sordo Balbín
Director del Grupo de Target y Aplicaciones Neutrónicas
ESS- Bilbao

2020

Tribunal nombrado por el Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2020.

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ____ de _____ de 2020 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

CALIFICACIÓN:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es el resultado del esfuerzo conjunto de muchas personas que participaron de manera directa o indirecta en la planeación y elaboración dentro de esta investigación. Primeramente, quiero agradecer a mis dos tutores a Antonio Rivera y Fernando Sordo por haberme acogido tan bien desde el comenzó por haberme hecho parte de su equipo de trabajo, a Antonio un agradecimiento especial por su incansable esfuerzo en todos y cada uno de los consejos que recibí de parte suya y haberme introducido al muy interesante campo de la fusión inercial, por su cercanía conmigo, no sólo desde el ámbito académico si no personal, gracias, profesor. Al Dr. Fernando por su cálida recepción y su especial dedicación en cada uno de los distintos problemas que surgieron en el camino hacia la elaboración de esta tesis, así como sus enseñanzas en todos y cada uno de los códigos que fueron utilizados y haberme asignado un lugar dentro de su equipo de trabajo. También quiero agradecer de manera muy especial al Dr, José Manuel Perlado quién desde el comienzo de esta aventura confió en mí, facilitándome todo lo que estuviera a su alcance para coordinar y sumar esfuerzos en este trabajo, por haberme considerado más que un estudiante de doctorado, un amigo. También quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) en México, por haberme concedido la beca 440828, sin la cual no hubiese podido desarrollar esta investigación, al Instituto de Fusión Nuclear GV, en España, por haberme recibido dentro de sus instalaciones, y muy especialmente a Elena Carpintero, también, agradezco la ayuda recibida por parte de la Cátedra Goded para poder realizar el congreso internacional ISFNT-14 en la ciudad de Budapest. A mi familia, a mis amadísimas madre Martha y esposa Gisela que fueron el pilar principal que sostiene a todo este esfuerzo, gracias, madre por siempre confiar en mí, gracias Gis por ser todo para mí. A mis tíos y tías que con sus ánimos y comentarios positivos reforzaron mi motivación. También agradezco a todos mis amigos de la UPM, en especial a mis Pablos, (Núñez y Díaz), gracias por todo, amigos, por sus charlas y ánimo positivo que imprimieron dentro de mí, a Lenin, Alejandro, Elisa, Miguel, Karen, Rafa, Julio, Andrés, Adrián, y en general a todos mis amigos que hicieron de esto una experiencia inolvidable, a todos muchas gracias.

RESUMEN

Actualmente, uno de los retos principales de la humanidad es la generación de una tecnología energética sostenible que sea capaz de sustituir la gran dependencia que se tiene de los hidrocarburos y el carbón, cuyas reservas además de ser muy contaminantes, son finitas. Bajo este contexto la generación de energía por fusión nuclear resulta ser una buena candidata. HiPER es el proyecto europeo de fusión laser para el desarrollo de una planta de potencia. Esta tesis hace uso de los desarrollos conceptuales de planta de potencia estudiados en HiPER. Uno de los elementos más importantes en una planta de potencia comercial por fusión es el manto reproductor de tritio, que tiene dos tareas principales: la extracción de potencia del reactor y la generación de tritio, materia prima para la reacción de fusión (D-T). También se encarga en mayor o menor medida, del blindaje, debido al frenado que sufre la radiación a través del manto.

En la actualidad existe un cúmulo de incertidumbres inevitables asociadas al ciclo de tritio. Esta tesis tiene por objetivo diseñar un concepto de manto reproductor de tritio versátil para plantas de potencia por confinamiento inercial con blanco directo, como HiPER. Como forma de evitar las incertidumbres, un objetivo fundamental es que la razón de cría de tritio (tritio generado respecto tritio quemado o TBR por *tritium breeding ratio* en inglés) pueda variarse durante operación para aumentar o reducir la cantidad de tritio producido según las circunstancias lo requieran.

Se ha optado por un diseño que mediante un reflector de neutrones permita la modificación sencilla y rápida del TBR entre 1.0 y 1.1, absorbiendo el 99% de la energía transportada por los neutrones. Además, se ha buscado un diseño compacto basado en la utilización de materiales conocidos. La opción estudiada ha consistido en un manto cerámico con un reflector de neutrones alrededor. Este es el elemento más original del diseño. Se trata de un tanque de agua (pesada, preferiblemente) que puede llenarse o vaciarse rápidamente para variar sus propiedades reflectoras, dejando escapar los neutrones de baja energía que le llegan (tanque vacío, TBR ~ 1.0) o termalizándolos y devolviéndolos al manto (tanque lleno, TBR ~ 1.1). Desde el punto de vista técnico, dicho reflector es análogo a la calandria (tanques de agua pesada) utilizada en los reactores tipo CANDU. Esta solución es considerablemente más sencilla que las propuestas anteriormente basadas en litio líquido enriquecido con ^6Li y que implica tener grandes reservorios de peligrosos metales líquidos para posteriormente ser bombeados por toneladas dentro del manto.

Entre los numerosos conceptos estudiados destaca el de un manto con cerámica de Li_2TiO_3 en tubos de Zircaloy-2, con una placa de Be (2 cm) para actuar como multiplicador neutrónico y un tanque de agua pesada. El espesor total del manto es de tan

solo 55 cm, diseño compacto, basado en materiales convencionales y no requiere enriquecimiento isotópico de la cerámica. El uso de Zircaloy-2 se reveló muy importante para el buen funcionamiento de este concepto gracias a su baja sección eficaz de captura neutrónica. Se consideraron más materiales cerámicos y estructurales. Entre todas las opciones destaca la novedosa cerámica de Li_8ZrO_6 que, aunque requiere estudios adicionales, es prometedora pues podría utilizarse sin multiplicador de neutrones.

Aparte de las consideraciones neutrónicas y sobre selección de materiales, se han tenido en cuenta otros aspectos, tales como, la respuesta termomecánica de los tubos rellenos de pellets cerámicos, posibles formas de extracción de calor mediante flujo de helio y la activación resultante tras un periodo prolongado de irradiación en condiciones realistas de planta de potencia. Los estudios llevados a cabo en estas áreas muestran que el diseño conceptual de manto reproductor con TBR variable es viable, pues cumple con los requisitos de producción de tritio, absorción de energía neutrónica, consideraciones termomecánicas para la estabilidad de los materiales y una activación tolerable desde el punto de vista de generación de residuos radiactivos. El diseño original propuesto en esta tesis requerirá estudios más avanzados para optimizar su funcionamiento y validar los prometedores resultados aquí reportados, incluyendo el desarrollo de prototipos y la validación experimental de los mismos. De tener éxito, el diseño presentado en este trabajo puede ser la base para solucionar el problema relacionado con las incertidumbres en el ciclo de tritio.

ÍNDICE

RESUMEN.....	vii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABLAS.....	xv
1 Introducción	17
1.1 Motivación	17
1.2 La cría de tritio.....	20
1.3 Motivación	23
1.4 El proyecto de HiPER.....	27
1.5 El manto reproductor de tritio con TBR variable	30
1.6 Estructura de la tesis	33
2 Métodos.....	35
2.1 Código de Monte Carlo (MCNP).....	35
2.1.1 Fundamento de Monte Carlo en transporte de radiación.....	36
2.1.2 Muestreo de la partícula	36
2.1.3 Estimación del error	37
2.2 Código ACAB.....	38
2.3 ANSYS	38
3 Diseño conceptual de un manto cerámico reproductor de tritio para plantas de potencias por fusión laser con TBR modulable en línea basado en un reflector neutrónico	41
3.1 Contexto.....	41
3.2 Introducción	42
3.3 Métodos	44
3.4 Resultados	46

3.5	Conclusiones	55
4	Manto reproductor con TBR variable basado en un reflector neutrónico: consideraciones termomecánicas, neutrónicas y sobre materiales	57
4.1	Introducción	57
4.2	Cámara de fusión y manto reproductor de tritio	60
4.3	Consideraciones sobre los materiales empleados	62
4.3.1	Materiales Cerámicos de Cría.	64
4.3.2	Multiplicadores Neutrónicos.	67
4.3.3	Materiales estructurales.	67
4.3.4	Reflectores Neutrónicos.	69
4.4	Montaje de las cerámicas: consideraciones termomecánicas	69
4.5	Consideraciones neutrónicas: producción controlada de tritio	72
4.6	Activación del manto.	80
4.7	Extracción de calor	82
4.8	Conclusiones	84
5	Conclusiones y trabajo futuro	87
5.1	Conclusiones	87
5.2	Trabajo futuro	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Planificación prevista para ITER-DEMO [7]	20
Figura 1.2. A) Sección eficaz de absorción neutrónica para el ^6Li y, B) Secciones eficaces de multiplicación neutrónica para el Berilio y el Plomo [137]	23
Figura 1.3. Escenarios estimado del inventario de tritio, 55.8kg de tritio será consumido por cada 1000 MW al año, el máximo inventario de tritio procedente de los reactores CANDU es de 27 kg [28].	26
Figura 1.4. Almacenamiento total de tritio en Canadá, Rumania y República de Corea, con las operaciones de ITER en plasmas con D-T, comenzando en 2036. Comparativamente, se requerirán pequeñas de T de anticipadamente para operaciones con plasmas T-T (que se muestran en la región sombreada). La región azul sombreada muestra una demanda DEMO potencial de entre 5 y 15 kg de T en 2055, con los marcadores negros que indican cómo cuanto tritio hay disponible dependiendo el escenario, o un marcador rojo que indica la fecha en que las reservas están agotadas [27].	27
Figura 1.5. Esquema de la cámara, manto y reflector para HiPER Prototipo y Demo. .	30
Figura 2.1 Mallado del (a) manto reproductor de tritio a la izquierdo y (b) de los tubos de material cerámico.....	40
Figura 3.1. Esquema de la cámara de ignición para HiPER modelada en MCNP6.	45
Figura 3.2. TBR en función del enriquecimiento del ^6Li en manto sin multiplicador neutrónico (Be). El recuadro muestra un boceto del manto.	46
Figura 3.3. TBR en función del espesor del reflector para dos casos, reflector de grafito y de agua pesada. Se usó cerámica porosa (10 cm en total) con un 60% de enriquecimiento en ^6Li y sin multiplicador neutrónico (Be).	47
Figura 3.4. TBR en función del espesor total de la cerámica porosa para distintos casos, curvas punteadas representan casos sin reflector, curvas continuas con relector de grafito. Se usó litio natural (excepto curvas rojas con 20% de ^6Li) con Be mezclado en el material cerámico en porcentajes del 10 al 25 at.%.....	48
Figura 3.5. Fracción de energía depositada por los neutrones en función del espesor total de la cerámica porosa de litio natural y con un contenido en berilio del 10-25 at.%.....	49
Figura 3.6. Diferentes configuraciones de las secciones del manto (B1-B6) con placas de berilio de 2 cm de espesor (P1-P5) insertadas en un manto de 40 cm.....	50

Figura 3.7. TBR en función del espesor del reflector, para dos distintas estrategias en el uso del multiplicador neutrónico (Be), en placas o como mezcla en el material cerámico. Por propósitos comparativos, una placa corresponde a ~5 at.% de berilio en la mezcla. El espesor total de la cerámica porosa de litio natural es 50 cm.	51
Figura 3.8. Vista transversal de la cría del tritio (g/día) en un manto con litio natural y con 5 placas de berilio de 2 cm de espesor, insertadas regularmente.....	52
Figura 3.9. Cría de tritio en cada sección del manto, para un manto sin enriquecimiento y con un reflector de agua pesada de 100 cm de espesor en dos casos, con un arreglo regular de las placas y con un arreglo optimizado como se describe en el texto.	53
Figura 3.10. Razón de la cría del tritio (TBR) (a) y el porcentaje de la energía primaria de los neutrones depositada en el reflector (b) en función del espesor del manto, con acero 316L ó zircaloy 2 como material estructural. Un tanque (vacío/lleño) de 2m de espesor con agua pesada actúa como reflector y una placa de 2.5 cm de espesor de berilio es colocada como multiplicador neutrónico, después del sustrato o material estructural y antes de la zona del material cerámico. La línea punteada horizontal indica 1% en energía perdida (0.14MeV/n) y la región cuadrada en azul indica la ventana operacional para un breeder funcional.....	54
Figura 4.1. Esquema de la cámara esférica de 6.5 m de radio (a), esquema de las distintas capas por las que atraviesa la radiación (b), detalle del manto (morado) con diferentes placas del multiplicador neutrónico Be (verde): 1 placa de Be (c) y 3 placas (d).	60
Figura 4.2. (a) Corte de un tubo de material estructural que contiene aglomerados (pellets) cerámicos. (b) Vista de la disposición de los tubos en un corte perpendicular a los ejes principales de los tubos. En azul, se resalta la celda unitaria utilizada para calcular la relación entre el volumen del tubo (azul) y el volumen vacío entre tubos. (c) Esquema que muestra los canales de enfriamiento y purga de He. Las flechas azules representan el flujo de He frío entrante; las flechas rojas, el flujo de He calentado saliente; las flechas verdes, el flujo entrante a través de los tubos utilizado para purgar el tritio generado en los tubos; las flechas amarillas, el flujo de He saliente arrastrando el tritio generado en los tubos. (d) Corte realista perpendicular a los ejes principales de los tubos para representar el flujo de He que actúa como refrigerante de los tubos.	63
Figura 4.3. Perfiles de temperatura en función de la distancia radial al centro del tubo, para tubos de Zircaloy-2 con diferentes radios internos, r (entre paréntesis) que contienen pellets cerámicos con una porosidad del 20%, (a) Li_2TiO_3 y (b) Li_8ZrO_6 . El espesor de la pared del tubo es de $d = 0.3$ cm para todos los casos.	71

Figura 4.4. Razón de producción de tritio (a) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor total del manto. Los cálculos se realizaron con tubos de Zircaloy-2 de radio interior $r = 1.75$ cm que contenían pellets de Li_2TiO_3 con una placa de Be de 2.0 ó de 2.5 cm de espesor. El área sombreada indica valores de TBR entre 1.0 y 1.1 con una pérdida de energía $<1\%$. La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector es un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica 74

Figura 4.5. Razón de producción de tritio en función del espesor total del manto (a) con reflector (símbolos sólidos) y sin reflector (símbolos huecos) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor del manto..... 75

Figura 4.6. Razón de producción de tritio (a) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor total del manto. Los cálculos se realizaron con tubos de radio interior $r = 1.75$ cm hechos de diferentes materiales estructurales que contenían pellets de Li_2TiO_3 y con diferente número de placas (Tabla 4.1). La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector era un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica. 76

Figura 4.7. Razón de producción de tritio (a) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor del manto. Los cálculos se realizaron con tubos de radio interior $r = 1.75$ cm hechos de Zircaloy-2 que contenían pellets de Li_8ZrO_6 o Li_4SiO_4 . En estos casos no se utilizaron placas de Be. El área sombreada indica valores de TBR entre 1.0 y 1.1 con una pérdida de energía $<1\%$. La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector es un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica. 77

Figura 4.8. Razón de producción de tritio (a) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor total del manto. Los cálculos se llevaron a cabo con tubos de radio interior $r = 1.75$ cm de Zircaloy-2 o Eurofer-97 rellenos con pellets de Li_8ZrO_6 . Cuando se utiliza placa de Be es de un espesor de 2 cm. La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector era un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica..... 78

Figura 4.9. Tasa de dosis de contacto por unidad de volumen para un manto con pellets de Li_2TiO_3 encapsulados en tubos de Zircaloy-2 (radio interior $r = 1.75$ cm). El espesor total del manto es de 55 cm. Como multiplicador de neutrones se utiliza una placa Be de 2 cm de espesor. La línea horizontal indica el límite de manipulación remota (1 mSv/h) para 1 m^3 de manto. 79

Figura 4.10. Tasa de dosis de contacto por unidad de volumen para un manto con pellets de Li_2TiO_3 encapsulados en tubos de Eurofer-97 (radio interior $r = 1.75$ cm). El espesor

total del manto es de 55 cm. Como multiplicador de neutrones se utiliza una placa Be de 2 cm de espesor. La línea horizontal indica el límite de manipulación remota (1 mSv / h) para 1 m³ de manto. 81

Figura 4.11. Tasa de dosis de contacto por unidad de volumen para un manto con pellets de Li₂TiO₃ encapsulados en tubos de acero 316-L (radio interior $r = 1.75$ cm). El espesor total del manto es de 55 cm. Como multiplicador de neutrones se utiliza una placa Be de 2 cm de espesor. La línea horizontal indica el límite de manipulación remota (1 mSv / h) para 1 m³ de manto. 81

Figura 4.12. (a) Energía depositada por el flujo de neutrones en un manto con un espesor total de 55 cm con pellets cerámicos de Li₂TiO₃ o Li₈ZrO₆ en tubos de zircaloy-2. Bajo estos parámetros es posible alojar hasta 13 tubos con un diámetro externo de 4.1 cm en la configuración mostrada en la Figura 4.2 (c). (b) Temperatura estacionara de cada tubo en un manto refrigerado por helio. 82

Figura 4.13. Temperatura en dirección radial en cada uno de los tubos de Zircaloy-2 con radio interior $r = 1.75$ cm y espesor de pared $d = 0.3$ cm, rellenos con pellets de Li₂TiO₃ y en contacto directo con el helio refrigerante. 84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Se muestran los principales parámetros de cada uno de los conceptos de reactores de fusión descritos [35–37]	28
Tabla 1.2. Condiciones para diferentes escenarios propuestos para HiPER [36].....	29
Tabla 4.1. Posiciones radiales de cada uno de los casos. R1 indica la posición radial donde comienza la placa y R2 hasta donde alcanza la placa (es decir $R2 = R1 + \text{espesor}$).....	62
Tabla 4.2. Composición elemental (en fracción de peso) de los materiales estructurales utilizados en este trabajo.....	68
Tabla 4.3. Propiedades del material cerámico y densidad del material equivalente” formado por pellets cerámicos en tubos de zircaloy-2 de radio interno $r = 1.75$ cm y radio externo $R = 2.05$ cm (espesor del tubo $d = 0.3$ cm) y dispuestos de forma compacta como se indica en la Figura 4.2(b).	72

1 Introducción

1.1 Motivación

En 1905, A. Einstein publicó sus cinco trabajos sobre relatividad especial, en donde se menciona el potencial energético que se encuentra encerrado en la materia, demostrando que materia y energía son dos estados de un mismo elemento. No fue hasta 1929 cuando el ingeniero y científico americano Irving Langmuir descubrió el plasma (una colección de partículas; significado “substancia moldeable” en griego) esencial para producir reacciones autosostenidas de fusión nuclear. Sin embargo, la fusión nuclear no fue percibida como una fuente potencial de energía hasta principios de los años 50. Actualmente la fusión es la aplicación más significativa del plasma [3]. Sin duda el concepto más estudiado es el confinamiento magnético (MFE), para lo cual se han propuesto varios conceptos que se han desarrollado internacionalmente, tokamak, stellarator, z-pinch y espejo, siendo el tokamak el concepto más atractivo. Actualmente, se encuentra en construcción el reactor ITER [4], un proyecto en el cual participan 35 naciones que comparten los gastos y esfuerzos científicos necesarios para construir un gran Tokamak con el objetivo de demostrar la viabilidad científica de la fusión nuclear como fuente de energía. Este proyecto ha construido ya más del 65% en sus instalaciones en Cadarache, Francia [5]. Entre los objetivos del Tokamak de ITER destaca producir 500 MW_t por más de 300 s con una ganancia de energía ($Q=10$). En ITER se realizará

pruebas con distintas propuestas de mantos reproductores de tritio o Test Blankets Modules (TBM) [1,6]. La fusión por confinamiento inercial (IFE), es otro concepto desarrollado para generar reacciones de fusión, la diferencia fundamental con su contraparte MFE es la forma en la que se espera confinar el plasma de fusión. Mientras que la MFE se basa en confinar el plasma mediante campos magnéticos intensos, la IFE se basa en procesos inerciales. Para ello se comprimen pequeñas esferas de combustible mediante haces láseres de alta potencia hasta que se alcanzan las exigentes condiciones de fusión. Durante un corto intervalo de tiempo, el plasma de fusión se encuentra confinado en el interior de la esfera generando las reacciones de fusión. Tras la deflagración de la esfera, se comprime un nuevo elemento y comienza de nuevo el ciclo. Mientras que en MFE se asemeja a un gran horno donde las reacciones de fusión se generan de manera constante, en IFE se pretende generar estas mismas reacciones de manera intermitente, este concepto ha pasado por diversas etapas de desarrollo científico. Existen muchos conceptos de reactores de fusión, aquí los clasificaremos según la forma de confinar el plasma: (i) confinamiento magnético (MFE, del inglés *Magnetic Confinement Fusion Energy*), (ii) confinamiento inercial mediante potentes pulsos láser (IFE, del inglés, *Inertial Confinement Fusion Energy*). La diferencia principal entre las dos formas de confinamiento radica en que mientras que la fuente de neutrones es volumétrica en los sistemas de enfoque MFE, el blanco representa una fuente de neutrones puntual para las plantas de IFE. Como resultado de esto, los neutrones que provienen de la fuente puntual para IFE impactan en la primera pared/manto en una dirección más perpendicular dando paso a una menor producción de tritio. La interacción de los neutrones procedentes de los blancos, altamente comprimidos en IFE, da como resultado una cierta termalización del espectro neutrónico incidente en las cámaras de este tipo. Estos neutrones poseen energías más bajas que en MFE, siendo su valor promedio ~ 12 MeV [7] La combinación de la geometría y los efectos del espectro pueden dar lugar a una eficiencia en la producción de tritio ligeramente más baja en las cámaras de IFE dependiendo del tipo y del grosor de la primera pared y del manto. Es más sencillo acomodar mantos grandes en cámaras de IFE que en las de MFE debido a las restricciones impuestas por el Divertor[7] Además, la ausencia de campos magnéticos hace que sea más fácil el empleo de metales líquidos en los distintos conceptos de manto para IFE.

En Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), en California se desarrolló el National Ignition Facility, NIF después de la campaña realizada por National Ignition Campaign NIC[8] en donde no se consiguió su principal objetivo “lograr la ignición” y a pesar de los grandes avances generados de esta campaña, las agendas relacionadas con IFE redujeron su actividad sensiblemente, En NIF, durante sus primeros 3 años obtuvo alrededor de 1 KJ de energía por cada disparo, muy por debajo de los 21 KJ “bombeados” al blanco por los rayos X y muy por debajo de los 1.8MJ del pulso láser original.

Actualmente NIF ha realizado substanciales mejoras en los instrumentos de diagnósticos, adaptación de sus láseres (4) y ha implementado innovadoras estrategias para generar los llamados “hot spots” En la campaña actual, que comenzó en 2017, los investigadores están aumentando las temperaturas al agrandar el hohlraum y la cápsula hasta en un 20%, aumentando la energía de rayos X que la cápsula puede absorber. Para aumentar la presión, están extendiendo la duración del pulso y cambiando de cápsulas de plástico a cápsulas de diamante más densas que permitirán comprimir el combustible de manera más eficiente. NIF ha logrado repetidamente rendimientos cercanos a los 60 kJ. Se planean disparos repetidos para medir qué tan cerca se acercaron a un “Burning Plasma”, que se prevé que ocurra alrededor de los 100 kJ. El Burning plasma es generado por los hot spots a medida que estos generan reacciones en cadena de fusión en sus alrededores, de manera sostenida y continua hacia todo el cuerpo del blanco. Este tipo de escenario es el que se pretende alcanzar con estas nuevas mejoras[9].

Los mantos reproductores son esenciales para el aprovechamiento de la energía generada en las reacciones de fusión mediante la conversión de la energía de los neutrones de fusión en calor y además, son los encargados de generar el tritio necesario como combustible primario mediante reacciones nucleares $\text{Li}(n,t)$. Mientras tanto y en los últimos años el panorama de la fusión se aprecia prometedor y no deja de dar sorpresas. En los últimos años se han roto varios récords mundiales, en China, en el Tokamak Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), se ha conseguido confinar y estabilizar un plasma por más de 100s estableciendo un récord mundial de funcionamiento con un pulso largo, operando en el modo H [10], Además en los laboratorios de Culham Center for Fusion Energy, en Reino Unido [11] se prevé una campaña para este año en la que culminara con el estudio de plasmas de deuterio-tritio [12], en la que puede ser posible que se rompa de nuevo el récord de potencia generada en JET en el año 1997, 16 MJ con una ganancia $Q=0.61$ [13]. Además también se han conseguido grandes avances en el área de imanes superconductores de alta temperatura, llegando a alcanzar los 45.5 teslas con estos imanes [14]. Aunado a todo este prometedor panorama, actualmente la iniciativa privada tiene varios proyectos entre manos uno de ellos es el de la Commonwealth Fusion Systems que tiene como objetivo la creación de SPARC [15] que es un reactor compacto gracias al campo magnético que proveen sus bobinas superconductoras. Se espera que SPARC alcance potencias de unos 50-100 MWt con una ganancia $Q=3$. Los avances son prometedores, pero el reto es enorme, aún quedan complejos problemas que resolver en todos los niveles. Sin embargo y a pesar de todos estos significativos avances, las expectativas que se han puesto en ITER y en su sucesor DEMO, un reactor demostrador para producción de energía, son muy grandes y no esperamos disponer de una planta de fusión comercial en los próximos 30 años, La Figura 1.1 representa de manera esquemáticas las agendas de estos proyectos.

Figura 1.1. Planificación prevista para ITER-DEMO [7]

El objeto de estudio de la presente tesis es el manto reproductor “breeding blanket” que juega un papel primordial en los reactores de fusión, no solo como elemento de cría del tritio, sino también, utilizando los neutrones excedentes y la radiación proveniente de la fusión, como elemento encargado de la conversión de energía nuclear en calor, así como, elemento de blindaje mediante frenado neutrónico y mediante diversas reacciones nucleares. La principal consideración a tener en cuenta en el diseño del manto es establecer la tecnología sobre la que se basa su diseño.

1.2 La cría de tritio

La reacción Deuterio-Tritio (D-T) es con diferencia la que presenta la mayor cinética de reacción, por lo que resulta la elegida para generar energía por fusión nuclear, a pesar de las desventajas asociadas a la generación de neutrones rápidos y la ausencia de tritio en la naturaleza. La carencia de este elemento radioactivo hace imprescindible producirlo *in*

situ. La ecuación 1 muestra esta reacción exotérmica, en donde la energía liberada total es 17.6MeV.

Utilizando estos 14.1 MeV y despreciando el calentamiento adicional debido a reacciones exotérmicas con neutrones en el manto, que puede añadir algunos MeV por reacción, se tiene que para producir una potencia de fusión P_F será necesario consumir tritio al ritmo dado por siguiente ecuación:

$$\dot{M} = 56P_F Kg^{-1}GW_T^{-1} \quad (1.2)$$

Un GW de potencia térmica es abreviada como GW_T . Una fracción de la potencia térmica (típicamente 20 – 30%) se transforma en potencia eléctrica mediante un ciclo térmico. Por otra parte, tenemos que considerar que el tritio es un emisor beta con un semiperiodo de desintegración de 12.3 años que genera 3_2He , un electrón e^- , y un antineutrino $\bar{\nu}_e$.

El isotopo estable del 3_2He posee varios usos, por ejemplo, en detectores neutrónicos, en disoluciones ${}^3_2He - {}^4_2He$ para refrigeradores que produce temperaturas de milikelvins, o en imágenes creadas con resonancias magnéticas [16]. A diferencia del tritio, el deuterio es un isotopo común, este isótopo del hidrógeno tiene una abundancia natural de 156 ppm, por lo que no constituye un problema extraerlo del agua. El problema surge cuando el inventario de tritio es muy bajo en comparación con la demanda de la industria de la fusión. ITER hará uso de 20 kg de T que ha sido acumulado de los reactores CANDU y otras fuentes que contribuyen en mucho menor medida. Tan solo $1GW_E$ de fusión con una eficiencia de conversión en el ciclo térmico de la planta del 30%, consumiría 20 kg de tritio en menos de dos meses. La factibilidad para la cría de este isótopo radioactivo depende de cuestiones de física básica e ingeniería. En la reacción de estos dos isótopos de hidrógeno (D-T) alrededor de 4/5 de la energía generada se la lleva el neutrón en forma de energía cinética y 1/5 por la partícula alfa, la cual deposita su energía en el plasma (α -heating) manteniéndolo caliente. La mayoría de los neutrones son absorbidos en el manto, donde deben producir algo más de un tritón por neutrón para compensar el consumo de combustible, las pérdidas en la extracción del tritio, las absorciones en materiales estructurales y el consumo de los nuevos reactores. En base a esto, la tasa de cría de tritio (TBR por su acrónimo en inglés, *tritium breeding ratio*) es definida como

$$TBR = \frac{\text{tritio criado o producido}}{\text{tritio consumido}} \quad (1.4)$$

Esto es, el cociente del número promedio de átomos criados o producidos de tritio en el interior del manto y el número de átomos consumidos en la reacción (Ec.1). Así pues, es necesario que el $TBR > 1$ para una economía de tritio autosustentable. Las reacciones óptimas para generación de tritio con los neutrones de fusión son:

La reacción ${}^6\text{Li}(n,t)$ es exotérmica (4.8 MeV), mientras que la reacción ${}^7\text{Li}(n,t)$ es endotérmica. A pesar de que la abundancia natural del ${}^7\text{Li}$ es muy alta (92.4%), la sección eficaz de la reacción ${}^7\text{Li}(n,t)$ es baja y solo apreciable para energías altas (Figura 1.2 A), por lo que la principal interacción con los neutrones que por otro lado están perdiendo energía rápidamente es a través de reacciones ${}^6\text{Li}(n,t)$ que tiene una gran sección eficaz, alrededor de 940 b con neutrones térmicos. Con la cuidadosa selección de los materiales estructurales y la geometría, es posible minimizar las pérdidas de los neutrones por absorciones (material estructural) o escape del manto. Los multiplicadores neutrónicos constituyen una segunda vía para generar flujo neutrónico y por consiguiente aumentar la cría del tritio compensando las pérdidas de neutrones que se pudieran generar. El interés de la reacción ${}^7\text{Li}(n,t)$ radica en que genera un neutrón adicional, es decir actúa como un multiplicador de neutrones, aunque debido a su baja sección eficaz con frecuencia no resulta suficiente y hay que utilizar otros multiplicadores. Otros dos materiales son los más comúnmente usados para este propósito, el Berilio y el Plomo (Figura 1.2 B). En el caso del berilio, y gracias a su bajo umbral energético en reacciones $n-2n$, y como se puede observar en la ecuación 7, uno de los neutrones n' ocasionalmente posee mayor energía para conducir otro ciclo de la misma reacción o ser absorbido por el ${}^6_3\text{Li}$.

Figura 1.2. A) Sección eficaz de absorción neutrónica para el ${}^6\text{Li}$ y, B) Secciones eficaces de multiplicación neutrónica para el Berilio y el Plomo [137] .

1.3 Motivación

El TBR requerido depende de muchos parámetros físicos y tecnológicos del sistema. Por ejemplo, La fracción de tritio que se quema dentro del plasma impacta la tasa de abastecimiento de tritio y el inventario de tritio asociado. Operando con un plasma en un modo de reciclado del tritio, aumenta la fracción quemada de tritio y reduce la tasa del combustible requerido y el inventario de tritio y, por lo tanto, mejora el potencial para lograr la autosuficiencia. Los parámetros tecnológicos que afectan al TBR requerido incluyen inventarios en los componentes de la cámara que dependen de las características de liberación y retención de tritio de los materiales utilizados, además como lo señala M.Kovari et al[17], los valores que se dan en la literatura para reactores específicos pueden variar ampliamente. La estimación del monto del tritio requerido para encender un reactor no es un ejercicio sencillo. El TBR requerido también se ve afectado, la eficiencia y fiabilidad del sistema en el procesamiento de tritio. Abdou et al, señalan que el inventario de tritio deberá proveer el tritio necesario para que el reactor continúe su operación si el sistema de reprocesamiento del tritio falla por algunas horas [7,18], concluyen que el reabastecimiento de combustible y el reprocesamiento exhaustivo en el circuito son primordiales, debido a que la fracción de quemado será muy baja. Por ejemplo, si un reactor con potencia de fusión de 3000 MW tiene una eficiencia de

quemado y reabastecimiento del 1%, y los tiempos de almacenamiento y reproceso son de 6 horas cada uno, entonces es necesario para encender el reactor 21 Kg. Por lo tanto, se vuelve prioritario la investigación en las mejoras en la eficiencia de reabastecimiento del combustible en el plasma, la fracción de quemado, y las tecnologías de reprocesamiento del tritio, la incertidumbre en todos estos procesos podría compensarse con valores de producción (TBR) muy altos, pero esto conduce a la presencia de grandes inventarios de tritio en el reactor, por consiguiente un aumento del riesgo radiológico de la instalación y hasta que estos importantes temas no estén completamente solucionados, es muy importante poder generar el tritio necesario a medida que evolucionen las necesidades del reactor. Las incertidumbres en el desempeño característico del plasma y de otros subsistemas del ciclo del combustible también contribuyen a la incertidumbre en el TBR requerido, estas incertidumbres surgen en varios niveles del desarrollo de un manto reproductor de tritio por ejemplo, existen incertidumbres inherentes a los códigos nucleares, en las bases de datos nucleares, en el modelado de los subsistemas, en la definición del sistema y depósitos no intencionales donde se retenga el tritio en todo el ciclo de combustible [19–21]. Los costos asociados al arrancar un reactor con plasmas D-T, con una proporción de $T < 50\%$, donde paulatinamente se vaya generando el tritio necesario, para posteriormente ser introducido en el reactor (en el supuesto escenario donde esto sea posible), son muy altos y el proceso extremadamente lento. Por ejemplo, se estima que de arrancar DEMO con sólo un 10% de tritio, el pago de los intereses durante la fase de acumulación de tritio (sin generar potencia) sería de \$6 mil millones o \$1.9 millones por gramo de tritio acumulado, adicionalmente, solamente el costo de la electricidad se estima en \$96000 por gramo de tritio acumulado [17]. Zheng et al [22], mencionan que es posible arrancar un reactor sin tritio, en un escenario D-D, pero M. Kovari et al, estiman que la problemática en la física que se genera a distintos niveles por hacer esto en el tokamak es inviable, por la diversidad de estados en lo que se tendría que confinar al plasma (por ejemplo, el reactor tendría que operar en un serie de niveles de potencia, todos con diferentes composiciones y sus asociados requisitos de confinamiento para generar potencia). Es por este motivo que surge como imperativo un diseño de manto donde se pueda hacer un ajuste directo sobre la cría del tritio, algunos autores ya han mostrado este hecho, y han planteado soluciones, principalmente en el área de MFE para manto o blankets de Li-Pb añadiendo al manto una cierta cantidad de material enriquecido en ^6Li [23,24]. Puesto que el tritio es el elemento que se tiene que producir de manera artificial es pertinente plantearnos la siguiente pregunta, ¿cuál es el panorama en el abastecimiento y generación del tritio? Para poner en contexto este punto, primero debemos de definir los requerimientos en el consumo que se tiene de este isótopo. Los sistemas de fusión necesitan 55.6 kg para operar durante todo un año a 1GW (Giga Watt= $1 \times 10^9\text{W}$)[25]. La primera generación de experimentos con el plasma, están diseñados sin el manto de tritio, y se apoyan en el tritio existente generado por otros

reactores. De cualquier forma, los recursos están disminuyendo por la naturaleza radioactiva del tritio (semiperiodo de desintegración de tan solo 12.3 años) además de una disminución en la tasa de producción. Los Reactores de fisión con moderadores de agua pesada como los CANDU (HWRs), son prácticamente la única fuente de suministro para ITER y otros sistemas que operan a base de D-T como DEMO, a pesar de haberse planteado rutas complementarias para la recopilación del tritio, estas reservas no serán suficientes [26,27]. El tritio será recolectado de estos reactores de agua pesada (HWR) a una tasa de 1.7 kg al año hasta el 2025 cuando esta tasa decrecerá rápidamente debido al término del tiempo de vida útil de los reactores (Figura 1.3). El tritio es vendido para varios propósitos a una tasa de 0.1 kg/año y adicionalmente se pierde un 5.47% por decaimiento radioactivo. Basados en estos valores el pico en el inventario de tritio será de 27 kg para finales de los 20, poco después tendrá un rápido decremento. El inventario total que estará disponible tendrá un rápido decremento por su uso en ITER que usará alrededor del 20% de este inventario en tan solo un año si suponemos que estará operando a unos 500 MW_t, esto supone que el tritio estará agotado en menos de 5 años de operación en ITER. Este escenario es el adoptado por Abdou et al en Ref. [28]. Una discusión más actualizada por Kovari et al [17] plantea tres posibles escenarios: (i) el escenario pesimista, en el cual los reactores HWRs de Korea, Canada y Rumania se cierran para alcanzar los 30 años de operación y ningún tipo de extensión de vida, y se vende parte del tritio en Canadá; (ii) el escenario moderado, donde los reactores de los países antes mencionados son renovados y se construye una planta en Rumania; (iii) el escenario optimista, en el que se renuevan todos los HWTs, se construyen más plantas y bajan las ventas del tritio en Canadá. La Figura 1.4 representas estos posibles escenarios con un descenso en las curvas debido al encendido del reactor chino CFETR. La primera generación de experimentos en ITER, que por ser una maquina experimental tendrá que operar con una $Q=10$, con potencias de fusión de alrededor de 300 a 600 MW, (dependiendo del confinamiento que se logre, la densidad y la presión máxima) están diseñados para operar sin tritio, ya que se comenzaran con otras reacciones como H-H y D-D, para finalmente pasar a una larga fase de experimental con D-T[7,28].

Figura 1.3. Escenarios estimado del inventario de tritio, 55.8kg de tritio será consumido por cada 1000 MW al año, el máximo inventario de tritio procedente de los reactores CANDU es de 27 kg [28].

En cualquiera de los escenarios propuestos, queda patente la importancia del suministro del tritio y la importancia de disponer de sistemas robustos para generarlo. En esta tesis se ha desarrollado un nuevo concepto de manto reproductor de tritio para IFE con blanco directo para plantas de fusión inercial, con TBR variable en tiempo real y de una forma sencilla (variando el llenado de un tanque de agua), una de las fortalezas del concepto propuesto. Otros conceptos reportados en el estado del arte para realizar esta tarea, además de ser conceptos de mantos reproductoras de tritio por confinamiento magnético, son mantos reproductores con litio líquido, la mayoría utilizan Li-Pb como elemento reproductor y multiplicador y consiguen variar el TBR a base de variar el enriquecimiento de ^6Li [19,23,24], tarea a todas luces mucho más complicada que el simple llenado/vaciado de un tanque de agua como se propone en esta tesis.

Figura 1.4. Almacenamiento total de tritio en Canadá, Rumania y República de Corea, con las operaciones de ITER en plasmas con D-T, comenzando en 2036. Comparativamente, se requerirán pequeñas de T de anticipadamente para operaciones con plasmas T-T (que se muestran en la región sombreada). La región azul sombreada muestra una demanda DEMO potencial de entre 5 y 15 kg de T en 2055, con los marcadores negros que indican cómo cuanto tritio hay disponible dependiendo el escenario, o un marcador rojo que indica la fecha en que las reservas están agotadas [27].

1.4 El proyecto de HiPER

Los dos proyectos más avanzados para demostrar la viabilidad de la fusión por confinamiento inercial mediante laser han sido: LIFE (Laser Inertial Fusion Energy) en los Estados Unidos [29–31], e HiPER (High Power Laser Energy Reserch), que es el análogo en Europa [32–34]. Ambos proyectos estaban orientados hacia la construcción de plantas de potencia funcionales, primero, a nivel de prototipo (LIFE.1, HPER-Proto) y después, a nivel de planta demostradora (LIFE.2, HiPER-Demo) pre-comercial.

LIFE presentó un proyecto de planta de potencia que se basaba en la demostración de ignición el gran laser NIF (National Ignition facility) [8,38]. Desafortunadamente esta campaña no tuvo el éxito esperado, y, aunque se consiguieron grandes progresos en el campo del confinamiento inercial, este hecho supuso un retraso en los proyectos de fusión inercial.

Tabla 1.1. Se muestran los principales parámetros de cada uno de los conceptos de reactores de fusión descritos [35–37]

	HiPER Demo	LIFE.2	MFE Demo
Confinamiento	Inercial con blanco directo	Inercial con blanco indirecto	Magnético
Tasa de repetición	10	16	Quasi-continuo
Potencia Térmica (MW _t)	1540	2200	3600
Radio de la cámara (m)	6.5	6	3-10 (radio menor - radio mayor)
Carga superficial neutrónica (MW/m ²)	2	3.6	2
Carga térmica superficial (MW/m ²)	0.8	1.26	10

La cría del tritio en HiPER como en cualquier reactor por fusión juega un papel fundamental. En el marco de HiPER se presentaron algunos conceptos [39–41] con mantos líquidos, usando como material estructural aceros ferrítico-martensíticos o aceros RAFM cuyo resistencia a la irradiación con neutrones rápidos alcanza los $\sim 10 - 20$ dpa [37,42], lo cual implicaría de 2 a 3 años de operación en un reactor comercial antes de tener que remplazar los módulos irradiados. Esta es la solución propuesta también en LIFE mientras no existan materiales con un uso a largo plazo. Para propósitos comerciales son necesarios esquemas de ignición avanzados, en los que, después de una compresión adiabática en el blanco, esta sea seguida del calentamiento del plasma [43]. El desacoplamiento entre las etapas de calentamiento y compresión es el principio que rige a los esquemas de ignición avanzados tales como ignición rápida [44,45] e ignición por choque [46–48]. Ambos esquemas de ignición han sido propuestos para HiPER, aunque el esquema preferido es la ignición por choque con blanco directo (en el que el blanco es iluminado directamente por los haces láser). Bajo el esquema de blanco directo es fundamental la uniformidad y la sincronización de la iluminación sobre el blanco. A pesar de que no se tiene un diseño definitivo de la cámara, se han propuesto algunos conceptos avanzados [34,41] y se prevén diferentes escenarios para el desarrollo de HiPER [49] (Tabla 1.1). Inicialmente, se requerirán instalaciones con el objetivo de probar un esquema de ignición avanzada con operación de láser repetitivos; donde la irradiación está limitada a unos pocos disparos con energías de ~ 20 MJ (HiPER-Exp). Posteriormente será necesario un reactor prototipo (HiPER-Proto) donde sea posible investigar el rendimiento de los blancos, la inyección y el seguimiento del blanco, la repetición, la extracción del calor y la producción del tritio, esto manteniendo baja la exigencia a los materiales, operando en condiciones “relajadas” con tasas de disparo de ~ 1 Hz y blancos

de 50 MJ. Finalmente, una etapa con un reactor demostrador (HiPER-Demo) operando bajo condiciones muy demandantes de planta de potencia, esto es, con altas tasas de repetición ~ 10 Hz y blancos de ~ 150 MJ. En la referencia [36] se muestran las condiciones principales para los diferentes escenarios de HiPER. En todos los escenarios, se asume una cámara esférica con 48 puertos para lentes cuadradas de 60×60 cm² encargadas de focalizar los haces láser sobre el blanco para obtener una iluminación simétrica y uniforme del blanco. La cámara con el manto reproductor de tritio y el reflector se describe esquemáticamente en la Figura 1.5, mientras que la Tabla 1.2 indica algunos parámetros relevantes en los distintos escenarios planteados. Un reactor por confinamiento inercial con enfoque comercial como HiPER-Demo deberá soportar condiciones extremas de irradiación. Esta tesis se basa en el esquema realista de planta comercial propuesto para HiPER-Demo.

Tabla 1.2. Condiciones para diferentes escenarios propuestos para HiPER [36].

Etapa	HiPER-Exp	HiPER-Proto	HiPER-Demo
Frecuencia	Ráfagas de hasta 100 disparos por ráfaga	1 Hz	10 Hz
Energía por disparo	20	50	154
Radio de la cámara	5.0	6.5	6.5
Distancia de las lentes al blanco	8	12 – 16	12 – 16

Bajo estas condiciones la cantidad de energía depositada por irradiación en la cámara está determinada por el espectro de emisión que se produce tras la explosión de un blanco comprimido mediante iluminación directa siguiendo un esquema de ignición por choque. Así, podemos estudiar la irradiación en función de los 4 tipos de especies emitidas: rayos x, iones producto de fusión, iones provenientes de plasma no “quemado” y neutrones. De estas especies alrededor del 71% de la energía que recibe la cámara procede de la energía cinética de los neutrones, cuyos espectros están dados cuantitativa y cualitativamente en [49–52]. El 1% de la energía procede de rayos X, y el $\sim 27\%$ restante de los iones, de estos, los productos de fusión constituyen el 13% de la energía depositada y el plasma no “quemado” alrededor del 14% [53]. Considerando para HiPER Demo un blanco directo de 154 MJ, podemos estimar una fuente de neutrones de 5.24×10^{20} n/s para una tasa de repetición de 10 Hz. La cámara propuesta para HiPER-Demo (Figura 1.5) es una cámara esférica evacuada con un radio de 6.5 m y paredes secas compuestas por varias capas: (i) una primera pared de wolframio (FW del inglés *First Wall*) de 1 mm de espesor directamente expuesta a la irradiación del blanco, sobre (ii) 1 cm de material estructural, iii) manto reproductor de tritio. El proyecto HiPER ofrece un estudio detallado que integra

diferentes aspectos para el desarrollo de la fusión nuclear. Desde aspectos fundamentales como lo es la física de la ignición, hasta aspectos tecnológicos. En este contexto esta tesis se centra en el diseño conceptual de un manto reproductor de tritio con un TBR variable.

Figura 1.5. Esquema de la cámara, manto y reflector para HiPER Prototipo y Demo.

1.5 El manto reproductor de tritio con TBR variable

Existen numerosos conceptos de manto reproductor en la literatura, sin embargo, y hasta la fecha nunca se han emprendido campañas de irradiación intensivas y a gran escala para determinar valores realistas. Se han realizado campañas de irradiación con plasmas D-T puntuales como las realizadas en el reactor JET en Reino Unido en 1991 (PTE), 1997 (DTE1) y (TTE) [54–58] y en el presente año se pretenden realizar nuevas irradiaciones con plasmas D-T con el ánimo de validar códigos neutrónicos y herramientas usadas en el diseño y análisis de ITER [59,60].

El proyecto de ITER contempla un programa completo destinado al desarrollo de los módulos de reproducción (*Test Blanket Modules* o TBMs). Dentro de este programa, se probarán diversas propuestas provenientes de siete grupos de trabajo que involucran a varias naciones, una vez seleccionados, los conceptos que hayan pasado la fase de investigación y desarrollo en un esfuerzo coordinado, pasarán por distintas etapas de irradiación con plasmas H-H y D-D para finalizar con plasmas con D-T [6,61]. Los mantos para IFE poseen ciertas ventajas sobre sus contrapartes en MFE, tales como una mayor área para alojar el material reproductor alrededor de la cámara de reacción de forma esférica y una geometría más eficiente que la existente en las cámaras toroidales con divertor de MFE [62]. Además, debido a la necesidad de mantenimiento remoto, la

instrumentación y equipamiento necesario en MFE es más compleja por las limitaciones de espacio y la intrincada geometría. En esta tesis se aprovechan las ventajas que proporciona la sencilla geometría de la cámara para IFE para desarrollar un concepto de manto que se basa en un reflector de neutrones (tanque de agua) colocado al final del manto en dirección radial, lo que permita maximizar el rendimiento del flujo neutrónico a través del todo el espesor del manto. En MFE, una configuración análoga requiere un estudio dedicado, dado que alrededor de la cámara es necesario posicionar los sistemas magnéticos de confinamiento y la disponibilidad de espacios para alojar los reflectores de agua pesada. Este concepto de manto evita la necesidad enriquecer el litio del manto lo que permite reducir los costos y la complejidad del reactor. Además, los mantos para IFE, gracias a la ausencia de campos magnéticos, permiten seleccionar mayor variedad de materiales estructurales, incluso ferromagnéticos puesto que estos no interfieren con el método de confinamiento. En esta tesis se plantea la utilización de materiales con baja absorción de neutrones desarrollados para reactores de fisión (zircaloy) para mejorar la economía neutrónica del manto. Algunos conceptos para IFE y reactores híbridos han aprovechado la ventaja de poder seleccionar materiales sin las restricciones de un campo magnético intenso y han llevado a cabo estudios con combustible tipo TRISO o con sales fundidas como el FLiBe del HYLIFE [50,63–67]. El uso de distintos materiales estructurales proporciona mayores prestaciones termomecánicas como es el caso del carburo de silicio o materiales con una alta transparencia y baja activación ante el flujo neutrónico como es el caso del vanadio [68–71]. Todo esto da lugar a muchas más consideraciones que serán discutidas con mayor detalle en el capítulo 5.

Para HiPER se han propuesto mantos líquidos de Li-Pb [39,40] mediante conceptos que consideran que la cantidad de tritio necesaria para puesta en marcha y operación está bien establecida desde el comienzo del diseño del reactor. Es decir, se trata de conceptos “rígidos” cuyos parámetros se establecen desde las primeras etapas del diseño del reactor sin considerar variaciones más allá de un rango de incertidumbre, por lo que una vez el reactor haya sido puesto en marcha estos diseños no tienen margen de maniobra ante variaciones sobrevenidas en la generación, extracción y consumo de tritio. El problema surge cuando el diseño de un manto cuenta con incertidumbres que no pueden ser eliminadas, mucho menos en la etapa de diseño y construcción del reactor [7,19–21,72], por lo que es un gran inconveniente generar más o menos tritio del estrictamente necesario, lo que provocaría problemas de inventario o carestía, respectivamente, si es generado más tritio del necesario el inventario en la planta irá aumentando con el tiempo, aumentando el riesgo radiológico. Aunado a esto, el efecto de la radiación sobre el manto tiende a variar la cría del tritio temporal y espacialmente (en mantos sólidos o cerámicos) [73]. Además, el TBR puede variar dependiendo de la cantidad de tritio que sea “quemado” en el plasma y los tiempos de extracción, difíciles de estimar [7]. Aunado a

todo esto, en ciertos momentos, será interesante generar inventarios de tritio particularmente altos para la puesta en marcha de nuevas instalaciones [72]. Para solventar estos problemas se han realizado algunas propuestas para modificar el TBR en operación. De esta forma la cantidad de tritio que se produce podría variarse de acuerdo con las necesidades de la instalación. Dichas propuestas se han realizado para MFE con mantos de Li-Pb modificando el enriquecimiento de ${}^6\text{Li}$ en el metal fundido a través del intercambio de toneladas de litio enriquecido en ${}^6\text{Li}$ material por litio natural o viceversa, según las necesidades de la planta. Tanto el enriquecimiento en ${}^6\text{Li}$ como el intercambio de metal fundido suponen grandes retos tecnológicos [19,23,24]. Nuestra propuesta es radicalmente distinta. No se basa en enriquecimiento del manto sino en la capacidad de variar la fracción de neutrones de baja energía en el manto simplemente llenando o vaciando un tanque de agua que rodea a un manto cerámico. En esta tesis se han realizado diversas simulaciones en mantos cerámicos, para: (i) determinar la importancia que tiene el enriquecimiento del litio con ${}^6\text{Li}$, (ii) seleccionar y utilizar un multiplicador neutrónico (berilio) y determinar, cualitativamente y cuantitativamente, si es posible utilizarlo en placas o como una mezcla homogénea en el litio cerámico usando la menor cantidad posible de Be, (iii) manipular la geometría del manto, del reflector y del multiplicador, asegurando el máximo rendimiento del flujo neutrónico. En cuanto al material reproductor, se ha optado por utilizar materiales cerámicos, Li_2TiO_3 , Li_8ZrO_6 y el Li_4SiO_4 cuyas características han sido ampliamente descritas en la literatura [74–82], estos materiales ofrecen alta resistencia a la radiación, buena compatibilidad química, integridad estructural, buena extracción de tritio en fase nanoestructurada, un buen factor de multiplicación energética, y baja activación (dependiendo de ciertos niveles de impurezas en estos materiales cerámicos) [83]. Al utilizar litio cerámico en el manto, es necesario en la mayoría de los casos utilizar un multiplicador neutrónico debido a que los cerámicos no poseen una cría de tritio tan alta como los mantos líquidos [7]. En este apartado debemos de tener en cuenta que el multiplicador neutrónico seleccionado es berilio, cuyas características de liberación retención y multiplicación de tritio gracias a su gran sección eficaz ($n, 2n$) de ~ 550 mb y su bajo umbral de 1.8 MeV, así como el factor de multiplicación energética en dicho material (superior al del Pb) [84–86], sin embargo, el berilio es tóxico y muy costoso, además el uso de este material tiene inconvenientes como se describe en la Ref. [87]. Existen ciertos requisitos mínimos que deben cumplir los materiales para ser considerados para el diseño de un manto reproductor de tritio (seguridad, durabilidad, rendimiento, mantenimiento, fabricación y costo) [88]. Los materiales que conforman un manto deben de tener características clave como son buena conductividad térmica, dureza, ductilidad, resistencia a choques térmicos, resistencia a la fatiga térmica, estabilidad estructural a altas temperaturas, baja activación y estabilidad a todas estas propiedades [89]. Teniendo esto en mente, en esta tesis hemos propuesto situar el litio cerámico dentro de tubos de Zircaloy-2 cuyas propiedades termomecánicas y

termoplásticas dentro de la industria nuclear han sido bien establecidas [90,91] gracias a su amplio uso en los reactores de fisión. En la tesis se discuten diversos aspectos relacionados con mantos constituidos por material cerámico en tubos con purga de He para extracción de tritio y refrigeración mediante He [74,78] y rodeados por un tanque reflector de neutrones. Así se ha establecido el rango de variación del TBR en función del cerámico empleado y el llenado del tanque, la integridad nanoestructural, la respuesta termomecánica y la liberación del tritio.

1.6 Estructura de la tesis

Esta tesis estudia una propuesta original de manto reproductor para HiPER-Demo, que aprovechando las ventajas inherentes que tiene los mantos por IFC sobre sus contrapartes para MFE, permite variar en tiempo real la generación de tritio. Se proponen soluciones sencillas y de bajo coste que puedan ser implementadas sin realizar grandes esfuerzos técnicos o económicos, utilizando materiales con gran tradición en la industria nuclear, manipulando geometrías en el diseño que nos evitan enriquecer el litio y así disminuir más la complejidad y costos del reactor. Así, hemos determinado ventanas operacionales en las que este concepto pueda funcionar con litio natural en cerámicos que tienen mayores ventajas operacionales que los mantos líquidos.

El capítulo 2 presenta la metodología, describiendo de una manera general los códigos, modelos y los procedimientos empleados en esta tesis.

En el capítulo 3 se describen los procesos de cría de tritio en un manto por confinamiento inercial para HiPER en donde se establecen las condiciones de irradiación neutrónica. En este capítulo se describe también brevemente los diferentes conceptos de mantos reproductores y el ciclo de combustible del tritio. Además, se discuten las diversas incertidumbres que surgen a partir del diseño del reactor.

El capítulo 4 describe el concepto de manto reproductor con litio cerámico para plantas de fusión laser (como HiPER) con TBR variable en donde se abordan las consideraciones que se tienen que considerar para establecer el TBR, además de la necesidad del uso de un multiplicador neutrónico en los mantos cerámicos. Se establecen comparaciones cualitativas y cuantitativas del uso de este material y los beneficios de un arreglo geométrico optimizado para el flujo neutrónico. En este capítulo también se aborda el uso de un reflector, las consideraciones sobre el uso de este, se explora una geometría que permite un alto TBR.

El capítulo 5 describe el papel de distintos materiales tanto para funciones de cría (cerámicas de litio) como estructurales (especialmente Zircaloy-2). En este capítulo se realiza un estudio de la activación de los materiales del manto en conjunto con los materiales estructurales. El uso del Zircaloy 2 como material estructural presenta ventanas operacionales muy aceptables debido a su baja sección eficaz de captura, este material es capaz de obtener TBRs que pueden ser modificados en tiempo real desde 0.99 hasta 1.1 para el caso del cerámico Li_2TiO_3 o desde 1.0 hasta 1.26 para el Li_8ZrO_6 . En este capítulo también se realizó un análisis de la refrigeración del manto bajo el diseño propuesto, así como las consideraciones que se tiene que tomar en cuenta para la extracción de tritio.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo y se proponen estudios más detallados principalmente termo-hidráulicos para este concepto.

2 Métodos

En este capítulo se da una breve descripción de las características principales de los códigos empleados para el diseño y optimización del manto cerámico para HiPER en el cual se realizaron diversas simulaciones de irradiación neutrónica e inventario isotópico, así como diversas pruebas termodinámicas y plásticas en los elementos cerámicos usados. En general en esta tesis se emplearon códigos altamente validados y que son referencia en su respectivo campo.

2.1 Código de Monte Carlo (MCNP)

Los métodos de Montecarlo son sistemas de simulación basados en análisis probabilísticos. Dentro del campo del transporte de partículas, el más conocido de ellos es el código *Monte Carlo N-Particle Transport* (MCNP) se empezó a desarrollar en el Laboratorio Nacional de Los Alamos (EE.UU.) en 1957. MCNP comenzó como un código de transporte de radiación para neutrones y fotones basado en secciones eficaces tabuladas. En 2004 se publicaron las primeras versiones del código MCNPX que acoplaba el código para simulación de reacciones nucleares de alta energía Lahex con MCNP5. Los análisis realizados en el marco de la presente tesis, relativos al transporte de radiación

se han desarrollado mediante las versiones del código MCNP6.1, y MCNP6.2. Dada la relevancia del código para la tesis, a lo largo de las próximas secciones se procederá a describir los fundamentos del código.

2.1.1 Fundamento de Monte Carlo en transporte de radiación

Los códigos de Montecarlo utilizan un proceso de muestreo estadístico para seguir individualmente la trayectoria de cada partícula. Es decir, partiendo de su posición actual y conociendo su energía y vector velocidad, se desplaza la partícula una longitud aleatoria en base a su recorrido libre medio en el material. Una vez desplazada la partícula se genera un evento. Los eventos, representa una estimación estadística de que le puede haber pasado a la partícula en su recorrido en el material en base a la sección eficaz de las diferentes reacciones. En dicho proceso estadístico se evaluá si la partícula continúa su movimiento o por el contrario sufre una colisión.

2.1.2 Muestreo de la partícula

Con el método Monte Carlo se trata de deducir el comportamiento promedio de todas las partículas en el medio al analizar unas pocas aleatoriamente. Para ello, se asocian los eventos físicos a una de una función de probabilidad $P(x)$, que describe la frecuencia relativa del evento x dentro de un intervalo de valores.

La probabilidad, $prob(x < X < x + \Delta x)$, que es la probabilidad de que una variable aleatoria tenga valores en el intervalo $(x, x + \Delta x)$, se relaciona con la función de densidad de probabilidad $p(x)$, por:

$$prob(x < X < x + \Delta x) = p(x) \text{ cuando } \Delta x \rightarrow 0$$

O con notación diferencial:

$$P(x)dx = \text{probabilidad de que ocurra una interacción entre } x \text{ y } x + dx.$$

Cuando x está dentro de un intervalo continuo, la probabilidad es:

$$prob(a < x < b) = \int_a^b p(x)dx \quad (2.1)$$

Y como $p(x)$, describe la frecuencia relativa de ocurrencia de x en todo intervalo de valores posibles de x , se cumple:

$$0 \leq p(x) \leq 1, \int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1 \quad \forall x \quad (2.2)$$

$P(x)$ puede ser continua o discreta. Por ejemplo: el espectro de energía de los neutrones de fisión x es una función de densidad de probabilidad continua, y una función de densidad discreta se puede construir con las probabilidades de absorción y dispersión en el material, utilizando las secciones eficaces microscópicas de absorción y dispersión: σ_a/σ_t y σ_s/σ_t , respectivamente.

La probabilidad de ocurrencia del evento $P(x)$ se estima promediando el número de veces que se produce el evento en la historia de las partículas individuales trazadas por el código. De esta forma, cuanto mayor es el número de partículas evaluadas (historias) menor es el error estadístico de la estimación.

2.1.3 Estimación del error

MCNP6 expresa las distribuciones de probabilidad en forma de conteos (llamados “tallies”) relacionados al número de partículas fuente (historias). Los tallies se muestran normalizados en función del número de historias y acompañados por el error relativo estimado R , definido como la desviación estándar estimada del promedio ($S_{\bar{x}}$) dividida entre el promedio estimado ($\bar{x}$).

El error, R , es proporcional a $1/\sqrt{N}$ (N es el número de historias), de tal manera que si se desea disminuir R a la mitad, se debe incrementar el número total de historias 4 veces. Dicha regla no se cumple en muestreos con una estadística pobre, en los cuales la estimación del propio error puede incorporar una gran incertidumbre.

Este error relativo estimado se utiliza para obtener intervalos de confianza alrededor del promedio estimado. El Teorema del Límite Central establece que conforme N tiende a infinito hay una probabilidad del 68% de que el resultado verdadero se encuentre en el

intervalo $x \pm R$, una probabilidad del 95% en $x \pm 2R$ y una probabilidad del 98% en $x \pm 3R$.

2.2 Código ACAB

El código ACAB se ha utilizado para realizar cálculos de transmutación y activación que generan inventarios isotópicos en aplicaciones nucleares. ACAB utiliza el método de matriz exponencial para resolver sistemas acoplados de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden con coeficientes constantes. Este tipo de sistemas de ecuaciones, son característicos de las desintegraciones radiactivas, en las que aparecen gran cantidad de ecuaciones diferenciales de primer orden con coeficientes constantes. La generación de los coeficientes del sistema de ecuaciones se realiza integrando el flujo neutrónico en función de la energía multiplicado por la sección eficaz de la reacción. Dicha operación se realiza mediante códigos auxiliares (Collaps) que permiten una gran flexibilidad en cuanto el tipo de entradas de datos a utilizar. El algoritmo principal de este código está basado en el código ORIGEN [92], y la estructura del programa está basada el código ACFA [93]. Versiones previas de ACAB [94], podían manejar todas las reacciones producidas desde el rango de neutrones térmicos hasta los 20 MeV. Para predecir transmutaciones por encima de los 20 MeV, el código fue actualizado [95].

ACAB es adecuado para simular escenarios operacionales realistas para muy diferentes sistemas nucleares: fusión inercial, fusión magnética, sistemas aceleradores, reactores de fisión, entre otros. Particularmente ACAB proporciona un modelado preciso y eficiente para instalaciones nucleares por confinamiento inercial como HiPER. Se pueden simular fácilmente procesos de irradiación y enfriamiento mediante la definición de “periodos” de irradiación y enfriamiento que se pueden repetir un numero especificado de veces. Estas características además del periodo “restart” (tiempo donde finaliza la irradiación) permiten modelar escenarios de irradiación de forma arbitraria.

2.3 ANSYS

Ansys es un programa computacional usado ampliamente en la industria del diseño ingenieril, este programa de tipo CAE, por su acrónimo en inglés (*Computer Aided Engineering*), o ingeniería asistida por ordenador. Se trata de un método numérico que permite analizar y simular diseños de ingeniería realizados con el ordenador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad, y rentabilidad. Su finalidad es optimizar su

desarrollo y consecuentes costos de fabricación, al reducir al máximo las pruebas físicas para la obtención del producto requerido. utiliza una interfaz gráfica llamada workbench. Este programa se encuentra dividido en tres herramientas principales llamadas módulos: preprocesado (creación de la geometría y mallado), procesador y postprocesador. El preprocesador y el postprocesador están provistos de una interfaz gráfica. El preprocesador de elementos finitos para la solución de problemas mecánicos incluye el análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no lineales), análisis de transferencia de calor y termohidráulica, también problemas de acústica y de electromagnetismo. Estas herramientas pueden ser usadas simultáneamente logrando mezclar problemas de estructuras junto con problemas de transferencia de calor, como un todo. Así ANSYS es un software basado en el método de elementos finitos, cuyo motor está basado en varios métodos iterativos que buscan la solución adecuada, dependiendo del tipo de problema, se seleccionará el mejor método.

El método de los elementos finitos o FEM (del inglés, finite element methods), es un método numérico basado en la descomposición de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados geométrica y matemáticamente por una serie de puntos llamados nodos, este método fue tomando relevancia a medida que se aumentaba la potencia de los ordenadores. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán la del elemento. Con esto se consigue fragmentar el problema al pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad gobernado por un sistema de ecuaciones diferenciales a un sistema con un número de grados de libertad finitos, el cual es gobernado por un número de ecuaciones diferenciales lineales o no. En este método existen conceptos básicos que tienen que ser discretizados. La discretización es el proceso de transformar el dominio geométrico de un continuo en una malla de elementos finitos. En este proceso se determina el tipo, la forma y el tamaño del elemento. Los elementos se encuentran unidos entre sí por nodos, ubicados en el contorno de los elementos (Figura 2.1). Posteriormente a la discretización se generan las ecuaciones que rigen el cálculo, también se aplican las condiciones de frontera del problema. Para este proceso se cuenta con varios métodos como el Método de Galerkin, de los Mínimos Cuadrados, de colocación. Después de obtener los sistemas que nos proporcionan las ecuaciones de cada elemento, se ensamblan las ecuaciones de los elementos como un solo sistema. El método de elementos finitos debe cumplir condiciones de continuidad en la frontera entre cada uno de los elementos. Con este proceso se logra obtener una matriz cuyo tamaño es igual al número de nodos de la malla por el número de grados de libertad. Una vez que se genera esta matriz, se imponen las condiciones de frontera, al reemplazar las condiciones de frontera la ecuación matricial se reducen las operaciones al eliminar los datos conocidos en el vector columna de incógnitas. Se procede a resolver el sistema de

ecuaciones reducido y se calculan los valores de las variables, se grafican los resultados, se analizan los mismos.

En el marco de esta tesis, se ha utiliza Ansys para evaluar las distribuciones de temperaturas de los sólidos y sus distribuciones de tensiones.

Figura 2.1 Mallado del (a) manto reproductor de tritio a la izquierdo y (b) de los tubos de material cerámico.

En el marco de esta tesis, se ha utiliza Ansys para evaluar las distribuciones de temperaturas de los sólidos a través de simulaciones en los tubos de material estructural que confinan al material cerámico y limitan su tamaño, así como simulaciones en la cuales se han determinado las distribuciones de tensiones en base a propiedades plásticas.

3 Diseño conceptual de un manto cerámico reproductor de tritio para plantas de potencias por fusión laser con TBR modulable en línea basado en un reflector neutrónico

3.1 Contexto

Un componente esencial de las plantas de potencias por fusión nuclear es el manto reproductor de tritio. Las principales funciones de un manto son la termalización de los neutrones mediante procesos de dispersión y la cría de tritio mediante reacciones nucleares con isótopos de litio. Como ya fue descrito en el capítulo 1, la escasez del tritio es un problema para la operación de la planta, mientras que un exceso en la producción constituye un exceso de inventario de difícil manejo y posiblemente contrario a la normativa impuesta por las autoridades reguladoras (se estima un inventario máximo total permisible inferior a 1 kg de tritio en planta en cada instante dado). La demanda de tritio puede variar en el transcurso de la vida útil de una planta. Adicionalmente, La producción de tritio e inventarios de tritio se encuentran sujetos a un considerable número de incertidumbres como se discutió en el capítulo 1. Una manera de solventar estos problemas es la de diseñar un manto reproductor de tritio con la capacidad de modular fácilmente la producción de tritio durante la operación del reactor. En este capítulo se describe la propuesta original de esta tesis de un manto reproductor de tritio para plantas de fusión nuclear por confinamiento inercial mediante láser. Se trata de un diseño conceptual que usa como material activo cerámicas de litio con berilio como

multiplicador neutrónico y un reflector de neutrones con capacidad variable de reflexión. El reflector es la pieza clave en este diseño. Consiste en un tanque de agua pesada que deja pasar neutrones cuando se encuentra vacío y los refleja muy eficazmente cuando está lleno. En este capítulo se demuestra que este manto cuenta con ventanas operacionales en donde se cumplen los requisitos necesarios para poder modular el TBR entre 1.0 y 1.1 a la vez que absorbe el 99% de la energía cinética de los neutrones incidentes y sin necesidad de usar litio enriquecido en ^6Li .

3.2 Introducción

La energía por fusión tiene el potencial de contribuir a la solución energética, evitando problemas de contaminación generados por el consumo global energético. Algunas grandes infraestructuras como, p.e., NIF [96] en los Estados Unidos, el Laser Mega Joule [97] en Francia, están dedicando parte de sus esfuerzos para comprender la naturaleza de los plasmas de fusión y avanzar en el progreso de la producción energética. Estos esfuerzos han motivado el desarrollo de varios proyectos con la finalidad de construir una planta laser pre-comercial, p.e., HiPER [36], el cual es nuestra referencia en este trabajo. Uno de los principales retos para el desarrollo de una planta de fusión nuclear comercial es la termalización de los neutrones y la producción y autosuficiencia del tritio en un manto reproductor. La falta de este elemento es un problema en una planta de potencia pues simplemente la deja sin combustible, mientras que el exceso de producción resulta ser un problema de seguridad. El objetivo de toda planta es alcanzar un TBR ligeramente superior a las necesidades de la planta ($\text{TBR} > 1$), asegurando la economía del tritio pero sin incrementar peligrosamente el inventario. El TBR óptimo puede cambiar a través del tiempo [7,19,72]. En la etapa inicial de operación de la planta, el TBR debe ser más alto que durante la operación normal, con la finalidad de compensar la retención esperada de tritio en depósitos no intencionales. Condiciones externas tales como la necesidad de tritio para puesta en marcha de otras plantas, hace deseable poder incrementar el TBR cuando la ocasión lo requiera. Adicionalmente, es reconocido que el TBR estimado está sujeto a importantes incertidumbres [19]. Confiar solo en los cálculos es un riesgo importante para el funcionamiento adecuado de una planta de potencia. Una planta actual necesita tener la capacidad de modificar el TBR durante operación para producir tritio bajo demanda compensando incertidumbres que son reconocidas a nivel de diseño y operación (a través del ciclo entero de combustible) [7,19,72]. Algunos reportes proponen maneras de variar el TBR en mantos líquidos para conceptos de MFE, mediante el intercambio de toneladas de litio enriquecimiento al 90% con ^6Li en el manto [19,23], lo cual puede realizarse durante operación, pero no precisamente de forma rápida ni sencilla. Adicionalmente los

mantos deben de cumplir con un número de requisitos, resumidos en 6 grupos: seguridad, durabilidad, rendimiento, mantenimiento, capacidad de manufactura, y costo [88]. Se han propuesto varios conceptos alrededor del mundo. Los conceptos basados en metales líquidos o sales fundidas presentan ventajas y desventajas con respecto a los conceptos cerámicos. Las ventajas incluyen una alta cría de tritio, muy baja permeación de tritio a través de elementos estructurales y buena conductividad térmica. Las desventajas incluyen inflamabilidad con el aire y agua, corrosión, alto índice de solubilidad del tritio en el litio y por lo tanto una difícil extracción y consecuentemente problemas de inventario, alta conductividad eléctrica y en muchos casos la necesidad del bombeo de todo el material mediante un circuito dedicado [81]. Estas desventajas limitan la flexibilidad en el diseño, por esta razón, esta tesis se ha centrado en mantos basados en cerámicas con baja reactividad química, con tamaños de grano pequeño (micro a nanoescala dependiendo del compuesto) para permitir la efectiva liberación del tritio y una mejorada resistencia a la irradiación [77]. Existen diferentes técnicas que aseguran el tamaño de grano. p.e. síntesis vía CTAB [98]. Cerámicas como el Li_2TiO_3 presentan un buen rendimiento en estos seis grupos [88], pero necesitan cumplir con requisitos adicionales: una alta generación de tritio, alta estabilidad térmica, excelente liberación del tritio a baja temperatura, densidad atómica razonable del litio, baja reactividad química y buena compatibilidad con otros materiales a alta temperatura.

En este capítulo se presenta un estudio neutrónico para validar diseño conceptual de un manto reproductor de tritio para plantas de potencia por fusión laser basada en el uso de litio natural con fácil variación o modulación del TBR durante la operación del reactor, con ayuda de un reflector neutrónico. Este capítulo se ha enfocado en la producción del tritio usando Li_2TiO_3 como un material modelo. El Li_2TiO_3 no es el material cerámico con la mayor densidad atómica, sin embargo, es un material equilibrado en el sentido que consigue valores razonables en todos requisitos impuestos al material del manto. Esto resulta ser una ventaja frente a otros materiales, además, exhibe fácil liberación del tritio en fase nanoestructurada, baja activación y una baja absorción de la humedad [81]. Todos estos parámetros han sido ampliamente estudiados [76,88,99], y es, de hecho, la elección para el HCSB TBM Japonés, y una opción para ser probada en ITER por parte de los diseños de TBM de China y Estados Unidos [1,6]. La densidad nominal del compuesto esta reportada en [100] y es 3.43 g/cm^3 pero se necesita una cierta porosidad en el cerámico para asegurar una correcta liberación del tritio [99]. Con el propósito de alcanzar un TBR alto, añadimos berilio como multiplicador neutrónico, gracias a su bajo umbral y gran sección eficaz con las reacciones $(n,2n)$, necesario para alcanzar el TBR requerido en los compuestos cerámicos. El berilio se usa en forma de óxido (BeO) y proporciona una mayor eficiencia cuando es mezclado en compuestos con Li_2TiO_3 , este nuevo compuesto mixto ($\text{Be-Li}_2\text{TiO}_3$) exhibe una mejor conductividad térmica y estabilidad

mecánica [101,102]. Son necesarios análisis más detallados porque el berilio es un metal tóxico y tiene algunas consideraciones peligrosas (manipulación, hinchamiento, deformación del grano y retención de tritio). De cualquier forma, desde el punto de vista de la neutróica, el BeO proporciona resultados similares al Be metálico simple. En este capítulo se ha estudiado el efecto sobre la neutróica del sistema al incluir Be mezclado con la cerámica dando lugar a un material teórico, es decir, sin entrar en la estabilidad química del compuesto. Los resultados obtenidos se han comparado con casos en los que el multiplicador se incluía en forma de placas metálicas. Los sistemas de placas son más realistas, versátiles y permiten separar el multiplicador del resto del manto. Los resultados obtenidos resultan comparables con los del Be mezclado y además permiten optimizar el TBR mediante la inclusión de placas estratégicamente distribuidas, como se discute en detalle. Por tanto, esta es la opción elegida en el resto de la tesis.

Por otro lado, se propone la utilización de un reflector neutrónico alrededor del material cerámico. El reflector es el componente responsable de la capacidad de ajuste del TBR durante la operación en la planta de potencia. Esta función se logra simplemente llenando o vaciando un tanque de agua (agua pesada) alrededor del manto reproductor. Este diseño proporciona una solución relista para modificar fácilmente el TBR en un amplio rango que supera las incertidumbres de diseño y da flexibilidad a las plantas de potencia asegurando el suministro de tritio, mientras se mantiene un inventario bajo de tritio. Los cálculos realizados en esta tesis muestran que el tamaño del manto puede ser compacto y que funcionará con litio natural sin necesidad de enriquecimiento isotópico lo cual reduce la complejidad y los costos de producción de este material, a diferencia de lo que ocurre con otras soluciones para mantos líquidos por confinamiento magnético [19,23,72].

3.3 Métodos

La cámara de fusión está basada en trabajos previos [36], en el marco del proyecto de HiPER. Se ha modelado el transporte neutrónico con el código en 3D MCNP6.1[103], usando las librerías ENDL/B-VII.I para todos los materiales involucrados y ACAB [104] para realizar el análisis de la activación y determinación de inventarios isotópicos (capítulo 2). El modelo consiste en una cámara esférica de 6.5 m de radio al vacío, que contiene varias capas tal como se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Esquema de la cámara de ignición para HiPER modelada en MCNP6.

La cámara está formada por distintos materiales en una estructura de capas: (I) Tungsteno de 0.1 cm de espesor como primera pared (FW), (II) 1 cm de material estructural (acero de baja activación), (III) manto reproductor de tritio que en este capítulo será Li_2TiO_3 cerámico con una densidad de 3.37g/cm^3 , la cual corresponde a un 2% de porosidad, (IV) reflector, principalmente agua pesada y en algunos casos grafito o agua ligera.

Las reacciones nucleares tienen lugar en el centro de la cámara al vacío, donde el blanco se inyecta a velocidades balísticas con la misma tasa de repetición que los disparos láser. El blanco está compuesto por deuterio y tritio en estado sólido ($\sim 15\text{ K}$). La compresión se produce mediante iluminación directa con 48 haces láser. En este capítulo usamos blancos de 136 MJ de forma análoga a lo propuesto en el proyecto LIFE [50]. De la energía del blanco, 100.4 MJ se depositan en la pared en forma de energía cinética de los neutrones, y los restantes 35.6 MJ en forma de rayos X e iones [50,105]. Considerando una tasa de repetición de 10 Hz, el reactor tendrá un término fuente de $4.82 \cdot 10^{20}\text{ n/s}$, y generará una potencia de 1360 MW.

3.4 Resultados

La Figura 3.2 muestra el efecto del enriquecimiento con ^6Li sobre el TBR en el material cerámico. En este caso, no se usa multiplicador neutrónico (Be) pero sí un reflector de agua pesada de 100 cm de espesor colocado alrededor de la cámara. El espesor total de la cerámica porosa es 40 cm, nótese que el espesor total de un manto real sería considerablemente mayor pues contendría material estructural para contener la cerámica, espacios vacíos y berilio (estas cuestiones se tratan en el capítulo 4). En este caso el único elemento multiplicador es el ^7Li , cuya fracción varía inversamente al enriquecimiento en ^6Li . El TBR alcanza un máximo de 1.03 para un 20% de enriquecimiento. Para enriquecimientos mayores el TBR decrece casi linealmente debido a la caída en el flujo neutrónico correlacionado con la reducción de ^7Li (multiplicador de neutrones) al aumentar el enriquecimiento en ^6Li .

Figura 3.2. TBR en función del enriquecimiento del ^6Li en manto sin multiplicador neutrónico (Be). El recuadro muestra un boceto del manto.

Tal como se ha comentado en secciones anteriores, el reflector juega un papel destacado en el rendimiento del sistema. Para explorar dicho comportamiento se ha utilizado un manto reproductor de 10 cm compuesto por cerámica porosa variando el espesor del

reflector. En la Figura 3.3 se muestra la evolución del TBR para reflectores de grafito y agua pesada. La sección eficaz de absorción neutrónica del agua pesada es menor que la del grafito. Esto explica el TBR más alto obtenido con agua pesada. La observación más destacable es la alta dependencia del TBR con el espesor del reflector. En el caso del agua pesada, el efecto del espesor del reflector se puede lograr en aplicaciones prácticas al llenar o vaciar un tanque, lo que constituye la base de nuestro diseño conceptual de manto reproductor para así poder modificar de manera directa y fácil el TBR durante la operación de la planta, en un importante rango de valores. En este ejemplo sin enriquecimiento de ^6Li y sin multiplicador neutrónico es posible obtener un TBR de alrededor de 1 con un tanque lleno de agua pesada y suficientemente grueso ($> 1 \text{ m}$).

Figura 3.3. TBR en función del espesor del reflector para dos casos, reflector de grafito y de agua pesada. Se usó cerámica porosa (10 cm en total) con un 60% de enriquecimiento en ^6Li y sin multiplicador neutrónico (Be).

Los resultados obtenidos en la configuración anterior, en la cual no se ha considerado un multiplicador neutrónico, nos lleva a plantear la pregunta de si es posible evitar la necesidad de enriquecimiento. Para clarificar este punto, se han realizado una batería de simulaciones en configuraciones con y sin reflector, variando el espesor total de un manto compuesto por litio natural. Para incrementar el TBR se introduce un porcentaje creciente

de Be, hasta un máximo del 25%. Esta configuración sería representativa de un caso extremo de TBR en la cual se busque forzar al máximo la producción de tritio.

Como se aprecia en la Figura 3.4. solo es necesaria una concentración de 10 at.% de Be mezclado con el material cerámico para alcanzar un TBR entre 1.1 y 1.2 para espesores mayores de 50 cm. Fracciones más altas de berilio resultan en un considerable incremento del TBR (> 1.4 para 25 at.% de Be). Por otro lado, la combinación de un 10 at. % de Be con el enriquecimiento en ^6Li , (curvas rojas), da lugar a un ligero incremento en el TBR que no justifica las complicaciones asociadas al enriquecimiento nuclear de este isótopo.

Cabe destacar que el reflector produce un incremento muy importante del TBR para mantos delgados pero su importancia se reduce de forma drástica para espesores superiores a 60 cm.

Figura 3.4. TBR en función del espesor total de la cerámica porosa para distintos casos, curvas punteadas representan casos sin reflector, curvas continuas con relector de grafito. Se usó litio natural (excepto curvas rojas con 20% de ^6Li) con Be mezclado en el material cerámico en porcentajes del 10 al 25 at.%.

Hasta ahora se ha estudiado el manto desde el punto de vista de la generación de neutrones. Sin embargo, es de suma importancia considerar el papel del manto para termalizar los neutrones. En nuestro diseño el manto debe de ser capaz de transferir la mayor parte de su energía al material reproductor, pero no al reflector, porque si ese es el caso, extraer energía eficientemente del reflector sería imposible o implicaría complicaciones adicionales en la operación de la planta. Por lo tanto, la fracción de

energía transportada por los neutrones que escapan al reflector debe ser muy reducida. Dependiendo del nivel del llenado del tanque, los neutrones pueden regresar al manto cerámico o escapar, así contribuyendo o no al TBR, respectivamente. La Figura 3.5 muestra la fracción de energía depositada en el manto en función de su espesor. Para depositar la mayor parte de la energía en el manto, el espesor total de la cerámica porosa debería superar los 40 cm. Obviamente, si disminuimos la porosidad del material cerámico necesitaremos mantos de mayor espesor.

Figura 3.5. Fracción de energía depositada por los neutrones en función del espesor total de la cerámica porosa de litio natural y con un contenido en berilio del 10-25 at. %.

Ahora analizaremos configuraciones (Figura 3.6) en las cuales el multiplicador neutrónico (Be) es insertado en forma de placas sólidas.

Figura 3.6. Diferentes configuraciones de las secciones del manto (B1-B6) con placas de berilio de 2 cm de espesor (P1-P5) insertadas en un manto de 40 cm.

Esta figura muestra un esquema en el que se pueden observar placas de berilio espaciadas regularmente cada 4 cm (a), o en posiciones optimizadas para maximizar el TBR (b). En el arreglo optimizado se incrementa significativamente la cría del tritio con tan solo reposicionar las placas. La regla que se utilizó para generar el arreglo optimizado es sencilla, relacionar la distancia entre las placas con la cría de tritio para evitar su caída por medio de las placas de berilio que al producir nuevos neutrones aumentan el flujo neutrónico.

La Figura 3.7 muestra simulaciones en las que el Be se ha introducido en mezcla o en placas. Por propósitos comparativos, se ha incluido la misma fracción de berilio en mezcla que en placas, ejemplo, la primera placa equivale a un enriquecimiento en el cerámico con berilio del 5 at.%, las dos primeras placas a un 9.56 at.% y así sucesivamente. En esta figura se puede observar unas pocas placas son más efectivas que la misma fracción equivalente en mezcla. También se muestra la facilidad de modificar el TBR al variar el espesor del reflector, se puede observar que una sola placa permite modular el TBR entre 1.02 y 1.11, tan solo incrementando el espesor del reflector de agua pesada (en términos prácticos, variando el nivel de llenado del tanque). En el caso equivalente con un contenido del 5 at.% de berilio en la cerámica se obtiene un TBR entre 0.98 a 1.07. En cualquier caso, tanto al aumentar el contenido en Be de la mezcla como al aumentar el número de placas de berilio se pueden alcanzar valores de TBR considerablemente más alto de lo necesario en una planta de potencia.

Figura 3.7. TBR en función del espesor del reflector, para dos distintas estrategias en el uso del multiplicador neutrónico (Be), en placas o como mezcla en el material cerámico. Por propósitos comparativos, una placa corresponde a ~5 at.% de berilio en la mezcla. El espesor total de la cerámica porosa de litio natural es 50 cm.

La Figura 3.8 hace visible el efecto del reflector sobre la producción del tritio a través de un manto con 50 cm de cerámica porosa y 5 placas de berilio. El tritio es generado principalmente en las proximidades de las placas. Cuando se usa un reflector, y sea de agua ligera o pesada, se produce un aumento en la producción de tritio en la región próxima al reflector (columnas finales). Este aumento corresponde a los neutrones termalizados que son reflejados hacia el interior del manto por el reflector y que fácilmente inducen reacciones (n,t) con el ${}^6\text{Li}$. Así, la presencia del reflector incrementa considerablemente el TBR con respecto al caso sin reflector. En el ejemplo, el TBR se incrementa de 1.21 sin reflector hasta 1.26 con un reflector de agua pesada de 100 cm. El caso de agua ligera proporciona un valor intermedio en el TBR, 1.24, lo cual muestra que incluso el agua ligera puede ser usada como reflector.

Figura 3.8. Vista transversal de la cría del tritio (g/día) en un manto con litio natural y con 5 placas de berilio de 2 cm de espesor, insertadas regularmente.

Como ya se ha mencionado, el TBR puede ser mejorado reposicionando las placas, como se muestra en el arreglo optimizado de la Figura 3.8 para el caso de 5 placas. Esto permite conseguir valores considerablemente mayores de TBR. La Figura 3.9 muestra el resultado de realizar este ajuste. Esto se debe al hecho de que las placas de berilio aumentan su eficiencia al ser reposicionadas más cerca de la fuente en la zona donde el flujo neutrónico es más efectivo, primeros 15 a 20 cm del manto reproductor, sin embargo, no se trata de un ajuste arbitrario, para conseguir esto se ha correlacionado el flujo neutrónico y por lo tanto la cría del tritio que se genera en cada sección del manto cerámico (B1-B5) con la distancia entre cada placa, por lo que queda un arreglo irregular que es una buena aproximación al ajuste óptimo. Al realizar esto se asegura que la energía de los neutrones es suficientemente alta como para inducir reacciones $(n,2n)$ con el berilio lo que aumenta el flujo neutrónico. Como resultado la fracción de neutrones térmicos en la última sección del manto (B6) cuando se utiliza reflector es mucho más alta que en el caso del arreglo no optimizado. La consecuencia es que el TBR se ve incrementado de 1.26 en el caso del arreglo regular a 1.36 en el caso optimizado, esto es un 8% de incremento sólo reposicionado las placas. Esto muestra que todavía hay espacio de mejora, por medio de

la optimización de parámetros tales como el espesor de reflector, la geometría, los materiales empleados, la fracción de berilio y la manera en como este es incorporado al manto.

Figura 3.9. Cría de tritio en cada sección del manto, para un manto sin enriquecimiento y con un reflector de agua pesada de 100 cm de espesor en dos casos, con un arreglo regular de las placas y con un arreglo optimizado como se describe en el texto.

Los análisis realizados hasta este punto, se basan en configuraciones teóricas en las cuales solo se consideran los materiales propios del manto, del reflector y del multiplicador neutrónico. A pesar de los buenos resultados de TBR obtenidos, la presencia de absorbentes neutrónicos, elementos estructurales y una menor densidad del manto, pueden alterar las conclusiones obtenidas.

Para identificar el comportamiento del sistema en condiciones más próximas a la realidad, se plantea una configuración en la cual el titanato de litio se introduce en el interior de vainas metálicas similares a las combustible nuclear de fisión tal como se muestra en la Figura 3.1(c). El titanato de litio natural (Li_2TiO_3) del interior de las vainas tiene una porosidad del 20%, esto es, tiene una densidad de 2.74 g/cm^3 . Este material se ha dispuesto en tubos, con un radio interno de 1.75 cm con un espesor de la camisa metálica de 0.3 cm. Los materiales estructurales utilizados (incluyendo el material de los tubos) son acero 316L o Zircaloy-2, ambos, materiales comunes en la industria nuclear. Se

empleó una única placa de berilio de 2.5 cm situada justo antes del material cerámico. Un tanque de agua pesada (vacío/lleño) es usado como reflector variable por detrás del manto y no necesariamente unido a este.

La Figura 3.10(a) muestra el TBR en función del espesor del material equivalente (cerámica, berilio y material de los tubos). La definición de ventanas operacionales más realistas requiere considerar una serie de incertidumbres, incluidas las derivadas de nuestro diseño [21]. Para dar cuenta de ellas, consideramos que un manto valido debe ser capaz de modular el TBR entre 1.0 y 1.1 y tener una pérdida de energía hacia el reflector $< 1\%$ de la energía primaria (los 14.1 MeV de los neutrones de fusión). El uso del Zircaloy-2, muy transparente para los neutrones, proporciona la deseada ventana operacional para mantos cerámicos con espesores de entre 55 y 60 cm (región sombreada) que demuestra la viabilidad del concepto de manto reproductor. En el siguiente capítulo discutiremos exhaustivamente los detalles de este manto y otros esquemas relacionados.

Figura 3.10. Razón de la cría del tritio (TBR) (a) y el porcentaje de la energía primaria de los neutrones depositada en el reflector (b) en función del espesor del manto, con acero 316L ó zircaloy 2 como material estructural. Un tanque (vacío/lleño) de 2m de espesor con agua pesada actua como reflector y una placa de 2.5 cm de espesor de berilio es colocada como multiplicador neutrónico, después del subtrato o material estructural y antes de la zona del material cerámico. La línea punteada horizontal indica 1% en energía perdida (0.14MeV/n) y la región cuadrada en azul indica la ventana operacional para un breeder funcional.

3.5 Conclusiones

Una planta de fusión láser debe producir tritio teniendo en cuenta las incertidumbres intrínsecas al diseño, las pérdidas de tritio inesperadas por acumulación en reservorios no intencionados, y las pérdidas de tritio dentro de todo el ciclo de producción y reabastecimiento, así como la diferente demanda de tritio durante la vida útil de la planta. Se ha mostrado en este capítulo, un diseño conceptual basado en un manto reproductor cerámico de Li_2TiO_3 no enriquecido con berilio como material multiplicador y un reflector neutrónico (tanque de agua). La energía cinética de los neutrones es transferida dentro del manto cerámico, pero una fracción de neutrones con bajas energías puede alcanzar el reflector y generar una importante diferencia en el TBR, de tal magnitud que el enriquecimiento de litio con ^6Li queda en segundo plano. Dependiendo del espesor del reflector, estos neutrones en mayor o menor medida son recuperados para incrementar la producción de tritio. Este efecto puede ser fácilmente conseguido, al hacer variar la eficiencia del reflector que depende del nivel de llenado del tanque de agua. Desde el punto de vista de la neutrónica, este concepto hace posible variar el TBR en un rango (1.0 – 1.1) que cubre el TBR requerido para el funcionamiento de una planta de potencia. El simple reposicionamiento de las barras de berilio a posiciones optimizadas en función del flujo neutrónico demostró ser mejor opción que el berilio mezclado con el material cerámico. El nuevo concepto de manto reproductor con TBR variable es una opción prometedora para cubrir un problema latente en el diseño de plantas de fusión.

4 Manto reproductor con TBR variable basado en un reflector neutrónico: consideraciones termomecánicas, neutrónicas y sobre materiales

4.1 Introducción

Una planta de fusión nuclear basada en la reacción deuterio-tritio, $d(t,\alpha)n$, inevitablemente necesitará una forma de (i) convertir la energía nuclear (transportada por los neutrones en forma de energía cinética) en calor, que, posteriormente, se utilizará para producir electricidad y (ii) generar tritio (existente en pequeñas cantidades en la naturaleza) con el fin de reemplazar el tritio consumido en las reacciones de fusión. Estas dos funciones esenciales precisan un componente especializado, el manto reproductor de tritio, como ya se ha mostrado en los capítulos anteriores. El litio es el elemento activo del manto reproductor elegido para la cría de tritio. Esto se debe al buen desempeño de este elemento como moderador de neutrones (debido a su ligera masa). Además, el litio es muy adecuado para regenerar el tritio consumido gracias a la alta sección eficaz de la reacción ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ (con neutrones de baja energía). La abundancia natural de ${}^6\text{Li}$ es baja ($\sim 7.6\%$), sin embargo, la reacción ${}^7\text{Li}(n, n't)\alpha$ (eficiente con neutrones de alta energía) actúa como un multiplicador neutrónico, contribuyendo a mejorar la tasa de reproducción

de tritio, TBR (ratio del tritio generado respecto al tritio quemado). Los cálculos han demostrado que el litio líquido no enriquecido puede proporcionar un $TBR > 1$, suficiente para mantener la economía de tritio de una central eléctrica [31]. Otras soluciones generales se han basado en el enriquecimiento isotópico de litio [19,23,72] y en el uso de multiplicadores de neutrones, típicamente Be y Pb, tanto para reproductores líquidos como sólidos [7,84,100].

La pregunta es cómo de realistas son estos cálculos del TBR. Este no es un punto menor. Como ya se ha mencionado, si confiamos en cálculos que den una sobreestimación de TBR se puede producir una escasez de tritio en la planta, mientras que una subestimación puede llevar a un exceso de inventario de tritio. Por lo tanto, una estimación deficiente en el TBR puede causar graves problemas de operación en la planta. Se ha reportado que la estimación de TBR está sujeta a importantes incertidumbres [19], como, por ejemplo, la evaluación de datos nucleares, la validación de códigos neutrónicos y las herramientas de modelado 3D [106]. El ciclo del tritio también es propenso a muchas incertidumbres debido a su complejidad intrínseca [9], como, por ejemplo, la cantidad y distribución de tritio a través del manto [7]. Además, las necesidades de tritio pueden cambiar durante la vida útil de la planta [7,19,72], siendo, por lo general, más altas en las etapas iniciales, después de la puesta en marcha de la planta, que más tarde, durante el funcionamiento normal. Además, la demanda de tritio puede verse afectada por decisiones no técnicas, como el requisito de aumentar la producción de tritio para suministrar combustible inicial a nuevas centrales eléctricas. En resumen, los cálculos de TBR no son lo suficientemente precisos debido a una serie de incertidumbres que comprometen el diseño del manto. Incluso si este no fuera el caso, la demanda de tritio podría variar durante la vida útil de la planta de una manera bastante impredecible. Por tanto, basarse únicamente en cálculos para diseñar un manto con un TBR fijo constituye un riesgo inaceptable para el funcionamiento de una central eléctrica. La única opción para superar esta situación es desarrollar mantos de reproducción de tritio con capacidad de ajustar el TBR durante operación. Algunas publicaciones muestran formas muy complicadas de lograr este objetivo, variando el enriquecimiento de litio en reproductores líquidos para plantas de energía de fusión por confinamiento magnético [19–21,23].

En el capítulo 3 y en la Ref. [107] por primera vez, presentamos una alternativa a las soluciones de enriquecimiento de litio para mantos con TBR variable. Nuestra propuesta se basa en un reflector (tanque de agua pesada) para los neutrones, con la capacidad de reflexión variable. Cuando el tanque está vacío, una fracción de neutrones de baja energía pueden escapar del manto, sin embargo, cuando el tanque está lleno estos neutrones se termalizan y son reflejados de nuevo hacia el manto donde contribuyen a aumentar el TBR con respecto al valor obtenido para un tanque vacío. En nuestra opinión, nuestro diseño de manto con TBR variable tiene claras ventajas sobre los anteriores diseños, que

requieren la preparación, almacenamiento y manipulación de metales líquidos con diferente enriquecimiento isotópico. Modificar el TBR en propuestas anteriores requiere reemplazar total o parcialmente el metal líquido que actúa como elemento de cría. En términos prácticos, esto solo se puede lograr reemplazando muchas toneladas de metal líquido caliente [19] (sustancia peligrosa y difícil de manipular). En contraposición, en nuestra propuesta, el cambio de TBR se logra simplemente modificando el nivel de llenado del tanque de agua, que no está necesariamente en contacto con la cámara de reacción. Por lo tanto, se espera que la modificación de TBR será una operación rápida y sencilla. Los tanques de agua pesada se utilizan como reflectores en las centrales de fisión desde los comienzos de la tecnología nuclear y las tecnologías relacionadas, tales como bombeo, el almacenamiento, la producción y el uso de agua pesada, son muy comunes.

Hasta ahora, se han estudiado mantos cerámicos en escenarios de fusión inercial [107]. Nuestro concepto de TBR variable puede, en principio, aplicarse a conceptos avanzados de mantos basados en reproductores líquidos y sólidos en desarrollo para la fusión magnética, sin embargo, se necesitan más estudios para abordar las sutilezas y complicaciones adicionales inherentes a las instalaciones de fusión magnética con respecto al diseño del manto. Nuestra motivación para estudiar principalmente los materiales de cría cerámicos fue evitar problemas conocidos y relacionados con metales líquidos como la inflamabilidad con el aire y el agua, la corrosión, el inventario de tritio o las complejidades técnicas para enriquecer y bombear el metal líquido [106]. Por el contrario, los materiales cerámicos son químicamente bastante inertes y cuando están nanoestructurados liberan tritio de manera efectiva y siendo más resistentes a la radiación que sus contrapartes de grano grueso [77,79,85], lo que los hace muy atractivos. Nuestros primeros resultados descritos en el capítulo 3 [107] proporcionaron muchos detalles sobre la neutróica. A través de ellos, pudimos estudiar el papel del reflector de neutrones, el papel del multiplicador neutrónico (Be), el papel del enriquecimiento isotópico y el papel de la absorción neutrónica por los materiales estructurales, para así poder determinar parámetros de optimización en el manto reproductor y el espesor del reflector. Además, para ir más allá de un ejercicio teórico de neutróica, en el capítulo 3 describimos brevemente un ejemplo práctico de un manto con TBR variable con dimensiones y materiales realistas (Li_2TiO_3 poroso sin enriquecimiento como material reproductor, una placa de metal Be como elemento multiplicador de neutrones, un tanque de agua pesada como reflector de neutrones y con zircalloy-2 en el material estructural). Este diseño proporciona una solución compacta, con materiales convencionales que permite modificar fácilmente el TBR en un amplio rango.

En este capítulo, se presentan en detalle consideraciones sobre selección de materiales, termomecánica y neutróica para contribuir a progresar hacia un diseño conceptual práctico de manto con TBR variable. Además, mostramos que hay margen de mejora,

principalmente, mediante una inteligente selección de materiales. De esta forma, presentamos otras alternativas que también pueden funcionar. Es particularmente relevante la cerámica Li_2ZrO_6 , que a pesar de no haber sido estudiada en detalle todavía, resulta muy atractiva pues podría funcionar sin multiplicador neutrónico. Se discutirán una serie de configuraciones realistas con aglomerados cerámicos (pellets) en tubos refrigerados de diferentes materiales.

Figura 4.1. Esquema de la cámara esférica de 6.5 m de radio (a), esquema de las distintas capas por las que atraviesa la radiación (b), detalle del manto (morado) con diferentes placas del multiplicador neutrónico (verde): 1 placa de Be (c) y 3 placas (d).

4.2 Cámara de fusión y manto reproductor de tritio

Los detalles de la cámara de fusión se basan en estudios previos llevados a cabo en el marco del proyecto europeo de fusión inercial HiPER [36] (capítulo 1). El esquema de ignición adoptado es ignición por choque. Para nuestros propósitos, consideramos blancos directos que producen 154 MJ por explosión (espectros obtenidos del proyecto ARIES [108]) e inyectados a una tasa de repetición de 10 Hz. Debido a que el blanco está altamente comprimido cuando se producen las reacciones de fusión, los neutrones sufren una considerable termalización. Como resultado, el espectro de neutrones se amplía hacia

energías bajas y la energía promedio de los neutrones cae de 14.1 a ~ 12.5 MeV. Por tanto, los neutrones transportan $\sim 71\%$ de la energía (109 MJ) a la pared de la cámara. La energía restante alcanza la pared principalmente en forma de pulsos de iones [36].

La mejor opción para blancos directos es una cámara esférica de pared seca en vacío, con un radio de 6,5 m y con 48 aberturas u orificios para los haces láser (Figura 4.1). Por lo tanto, para a una tasa de repetición de 10 Hz, la potencia nominal es 1540 MJ que corresponde a 5.4×10^{20} n/s o en fluencia neutrónica por disparo en la cámara a $1.02 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ (siendo el flujo de neutrones promedio $1.02 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$). La pared tiene una estructura de capas tipo cebolla: (i) una primera pared (FW) de ~ 1 mm de espesor de material refractario que actúa como una armadura contra descargas pulsadas de iones; (ii) un material estructural de ~ 1 cm de espesor para soporte mecánico; (iii) el manto reproductor para generar tritio mediante reacciones neutrón-litio y para termalizar neutrones mediante la conversión de energía nuclear en calor. Además, un reflector de neutrones (iv), que no está necesariamente unido a la pared de la cámara, es esencial en nuestro diseño para cumplir con el objetivo de un manto con capacidades de modulación del TBR en línea. Según vimos en el capítulo 3 [107], la mejor opción es un tanque de agua (pesada), que puede llenarse o vaciarse fácilmente para variar la capacidad de reflexión de neutrones y, por lo tanto, el TBR. El manto reproductor se basa en cerámica de litio no enriquecido. Además, es necesario un multiplicador neutrónico (berilio) en la mayoría de los casos para alcanzar los niveles requeridos del TBR. En el capítulo 3 se demostró que el multiplicador de neutrones es más eficaz colocado dentro del manto en forma de placas. El espesor de las placas es generalmente 2 cm y están colocadas en posiciones optimizadas para maximizar la producción de tritio, como se indica en la Tabla 4.1.

Se ha empleado el código MCNP6.1 y MCNP6.2 para el modelado en 3D del transporte del flujo neutrónico, usando las bibliotecas de datos nucleares ENDL/B-VII.I en una estructura de 275 grupos de energía para todos los materiales. Para los estudios de activación y determinación de inventarios isotópicos, se utilizó el código ACAB-2008 [104]. Se calculó el flujo neutrónico y la potencia depositada sobre cada elemento de volumen del manto mediante el código de transporte MCNP6 y se usó el módulo mecánico de ANSYS [120] para análisis térmico y de tensión. Para diseñar un manto reproductor de tritio más realista, el material cerámico se ha insertado dentro de tubos de material estructural, que en principio cuentan con radio interno variable. El radio óptimo de los tubos del manto se ha estimado de modo que tanto la temperatura como el nivel de tensiones del cerámico y del material estructural esté en los rangos usuales de operación.

Tabla 4.1. Posiciones radiales de cada uno de los casos. R1 indica la posición radial donde comienza la placa y R2 hasta donde alcanza la placa (es decir $R2 = R1 + \text{espesor}$).

5 placas de berilio			
R1(cm)	Placas	R2 (cm)	Espesor (cm)
653.6	P1	655.6	2
658.2	P2	660.2	2
662.3	P3	664.3	2
665.8	P4	667.8	2
668.8	P5	670.8	2

3 placas de berilio			
R1(cm)	Placas	R2 (cm)	Espesor (cm)
651.1	P1	653.6	2.5
656.1	P2	658.1	2
660.8	P3	662.8	2

1 placa de berilio			
R1(cm)	Placas	R2 (cm)	Espesor (cm)
651.1	P1	653.1 (653.6)	2 (2.5) *

* Generalmente se usó placa de 2 cm, con alguna excepción.

4.3 Consideraciones sobre los materiales empleados

Los mantos reproductores de tritio deben de cumplir una serie de requisitos, principalmente en seguridad, vida útil, rendimiento, facilidad de mantenimiento, fabricación y coste [88,109]. Una buena selección de materiales es la clave para obtener una puntuación alta en todos estos requisitos. Hasta ahora se ha trabajado en un diseño conceptual. Por lo tanto, no se han considerado detalles de ingeniería. Sin embargo, no se puede ignorar el papel de los materiales, incluso, en esta etapa, de lo contrario las conclusiones resultantes serían demasiado especulativas para ser útiles y para poder seguir avanzando en el diseño del manto.

Figura 4.2. (a) Corte de un tubo de material estructural que contiene aglomerados (pellets) cerámicos. (b) Vista de la disposición de los tubos en un corte perpendicular a los ejes principales de los tubos. En azul, se resalta la celda unitaria utilizada para calcular la relación entre el volumen del tubo (azul) y el volumen vacío entre tubos. (c) Esquema que muestra los canales de enfriamiento y purga de He. Las flechas azules representan el flujo de He frío entrante; las flechas rojas, el flujo de He calentado saliente; las flechas verdes, el flujo entrante a través de los tubos utilizado para purgar el tritio generado en los tubos; las flechas amarillas, el flujo de He saliente arrastrando el tritio generado en los tubos. (d) Corte realista perpendicular a los ejes principales de los tubos para representar el flujo de He que actúa como refrigerante de los tubos.

En este trabajo, exploramos varias combinaciones de materiales. Intentamos utilizar materiales convencionales bien conocidos para acercarnos lo más posible a un diseño realista. Como se discutió en la sección 4.1, hemos considerado materiales cerámicos para evitar algunos problemas relacionados con metales líquidos o sales fundidas [81]. Sin embargo, una desventaja de los materiales cerámicos, como el titanato de litio (Li_2TiO_3) y el ortosilicato de litio (Li_4SiO_4), encapsulado en materiales estructuras convencionales, es que necesitan la ayuda de un multiplicador de neutrones para proporcionar buenos valores de TBR. Exploramos en la Sección 4.6 una cerámica con alta densidad en litio como lo es el zirconato de litio (Li_8ZrO_6), con muy buenas propiedades neutrónicas hasta el punto de que mostraremos que su uso en tubos de Zircaloy-2 conduce a valores de TBR suficientemente altos sin necesidad de un multiplicador de neutrónico. En general, la solución óptima para obtener un buen TBR es insertar placas de Be en el manto para que actúen como multiplicador de neutrones, Figura 4.1(c). En el capítulo 3 se discutieron alternativas al uso de placas de Be y algunas de ellas se mencionan brevemente a continuación. Los materiales estructurales no pueden ser ignorados en esta etapa de

diseño, tanto por su interacción con los neutrones, con efectos perjudiciales por la inevitable absorción y activación de neutrones, como por su impacto en la geometría final del manto. Hemos considerado varios materiales utilizados en la industria nuclear (Zircalloy-2, acero 316L y Eurofer-97) como material para los tubos contenedores de los pellets cerámicos, Figura 4.2(a)). Finalmente, se da una breve discusión sobre el reflector de neutrones. En resumen, la mejor opción es el uso de un tanque de agua pesada, aunque el agua ligera también podría funcionar (capítulo 3).

4.3.1 Materiales Cerámicos de Cría.

Los materiales cerámicos deben cumplir una serie de requerimientos [81,88,110] para ser considerados como un material de cría y más específicamente en nuestro concepto de manto con TBR variable:

- i. La cerámica debe proporcionar un TBR suficientemente alto. El TBR generalmente se ve comprometido por la presencia de isótopos en la cerámica que no contribuyen a generar tritio, a diferencia de lo que ocurre al usar litio líquido. Por tanto, las cerámicas suelen proporcionar valores bajos de TBR. Para superar esta dificultad es necesario, en la mayoría de los casos, el uso de multiplicadores de neutrones [7], en nuestro caso, placas de Be.
- ii. La conductividad térmica debe ser lo suficientemente alta para permitir un enfriamiento eficaz que mantenga la temperatura dentro de los límites operativos [109].
- iii. La liberación de tritio debe ser lo suficientemente rápida para mantener el suministro de tritio de la planta. Por lo general, el transporte de tritio está limitado por la difusión a lo largo de los granos cerámicos, por lo tanto, la única forma de mejorar la liberación de tritio es aumentando la fracción de porosidad abierta y reduciendo el tamaño de grano, si es posible a la nano-escala, siempre que los granos resultantes sean estables a las temperaturas de operación [98,111,112].
- iv. El daño por radiación debe ser lo suficientemente bajo para garantizar el rendimiento del manto durante un período compatible con las tareas de mantenimiento y consideraciones económicas. Esto implica que la degradación inducida por irradiación debe estar bajo control para preservar las propiedades químico-físicas de la cerámica y que la liberación de tritio no debe verse obstaculizada por sitios de captura de tritio inducidos por irradiación [99,113].

- v. La cerámica debe ser compatible con los materiales de soporte y debe preservar su integridad estructural cuando está confinada en compartimentos como tubos a diferentes temperaturas [74,76,78,110].
- vi. La activación a través de reacciones de transmutación debe producir isótopos de vida corta para hacer posible la implementación de procedimientos de eliminación y reciclaje de desechos nucleares [114].
- vii. Con la finalidad de desarrollar un manto con un TBR variable y superar las incertidumbres de diseño, la cerámica debe proporcionar valores del TBR en un amplio rango [21], desde $\lesssim 1.0$ hasta un valor tan alto como 1.1. Esto se consigue en nuestro concepto, modificando la potencia del reflector con el nivel del tanque de agua (modos lleno/vacío). La energía transferida por los neutrones al reflector debe ser $<1\%$ del total, puesto que la energía perdida en el reflector difícilmente podrá reciclarse para generación eléctrica. Este punto se analiza a fondo en la Sección 4.5

Existen varias cerámicas (por ejemplo: Li_4SiO_4 , Li_2TiO_3 y Li_8ZrO_6) bien caracterizadas [74,100,112] por medio de estudios sobre producción y liberación del tritio [75,115] incluyendo “in-pile tests” [78,83,115] Discutiremos varias opciones que cumplen con el requisito (vii) con **Li_2TiO_3** . A pesar de que esta cerámica no tiene una alta densidad atómica de litio en comparación con otras opciones, es una cerámica equilibrada que cumple razonablemente bien la lista de requisitos y se comporta particularmente bien con respecto a la liberación y activación de tritio [7]. Los parámetros principales del Li_2TiO_3 están bien establecidos [76,88,99] y, de hecho, es la elección para el TBM HCSB (Helium Cooled Solid Breeder) japones y una opción para China y UE [1,6]. Wang et al. mostraron en la Ref. [29] que es posible sintetizar Li_2TiO_3 con un tamaño de grano de 50 nm a 1023 K, aumentando suavemente con la temperatura hasta un tamaño de grano <100 nm, a los 1073 K. Por encima de esta temperatura, el tamaño de grano aumenta abruptamente, lo que es perjudicial para la liberación de tritio. La densidad nominal de Li_2TiO_3 es de 3.43 g/cm^3 [100] pero la densidad obtenida por Wang et al. a 1023 K era $<80\%$ de la densidad nominal, lo que indica que el material resultante es poroso como se requiere para facilitar la liberación de tritio [98]. No se dieron detalles sobre el tipo de porosidad desarrollada. Sin embargo, a partir del trabajo de Peeters et al. [79], podemos estimar que la porosidad abierta esperada para esta densidad es $\sim 14\%$, un valor bastante aceptable para asegurar la liberación de tritio. Para estimar el rango de temperatura de operación en el que el Li_2TiO_3 cumple la lista de requisitos, debemos considerar no solo las condiciones para preservar la microestructura [112] (porosidad y tamaño de grano, que acabamos de comentar), sino también los efectos perjudiciales relacionados con la evaporación del Li [115] y los problemas relacionadas con la liberación de tritio a temperaturas demasiado altas, así como, la acumulación de defectos (trampas para tritio)

a temperaturas demasiado bajas [113]. En este trabajo, Kobayashi et al. demostraron que a temperaturas superiores a 600 K, la eliminación del tritio de los defectos es eficaz, a la vez que la difusión de tritio es alta para muestras con tamaño de grano pequeño (<100 nm). Teniendo en cuenta estas consideraciones, para el propósito de este trabajo, establecemos una temperatura máxima de operación de 800 K para el Li_2TiO_3 , lo que, según los datos publicados, es un buen parámetro para conciliar las diferentes consideraciones discutidas hasta ahora. Además, esta temperatura es compatible con las temperaturas de funcionamiento de muchos materiales estructurales.

Como se anticipó anteriormente, una gran ventaja del Li_8ZrO_6 es que puede proporcionar valores de TBR muy altos sin un multiplicador neutrónico. Esto es debido a la alta densidad atómica de litio en esta cerámica. Se trata de un material menos estudiado que las otras cerámicas aquí propuestas, pero aun así bien caracterizado [74]. Es más difícil de sintetizar que Li_2TiO_3 y es más difícil obtener granos pequeños. Con respecto a estudios con tritio, no se ha estudiado tan extensamente como Li_2TiO_3 . Shin-mura et al. estudiaron su estabilidad térmica [115], observando pérdida de Li y descomposición en dos fases a 1173 K. Estos autores propusieron [116] el uso de Li_5AlO_4 para estabilizar al Li_8ZrO_6 . La combinación de ambas cerámicas al calentar conduce a un sistema de 4 fases más estable. Debe tenerse en cuenta que esta temperatura está muy por encima de los rangos de operación de los materiales estructurales convencionales y por tanto se producirían problemas mecánicos mucho antes de comenzar a producirse la descomposición del material. Por otro lado, se trata de un valor considerablemente más alto que la temperatura máxima de operación que usamos para el Li_2TiO_3 . Para estimar el rendimiento de esta cerámica para un manto con TBR variable y a falta de datos más precisos, tomamos como temperatura máxima de operación 800 K. Debido al comportamiento prometedor del Li_8ZrO_6 , deberían llevarse a cabo más esfuerzos experimentales sobre síntesis, estabilidad y producción de tritio en esta cerámica.

El Li_4SiO_4 es otra cerámica ampliamente estudiada para aplicaciones de cría de tritio. En este artículo nos concentramos principalmente en las cerámicas Li_2TiO_3 y Li_8ZrO_6 , sin embargo, a modo de comparación, mostramos algunos ejemplos con Li_4SiO_4 , puesto que es una cerámica bien estudiada como material de cría debido a su alto punto de fusión (>1500 K), su alto contenido de litio (0.54 g/cm³), así como su excelente comportamiento frente a la liberación del tritio. Además, los pellets del Li_4SiO_4 se han propuesto como el primer candidato para el helium-cooled solid breeder TBM en China y Europa [117]. Se están desarrollando otras cerámicas para cumplir con los requisitos de los materiales cerámicos de cría. Todos ellos tienen pros y contras como se discutió para las cerámicas utilizadas en esta tesis. En principio, podríamos incorporar cualquier cerámica novedosa a nuestro diseño conceptual. Estudios posteriores determinarán si en diseños realistas se pueden cumplir o no los requisitos exigidos.

4.3.2 Multiplicadores Neutrónicos.

Para aumentar el TBR producido por la mayoría de las cerámicas de litio no enriquecido, se necesita un multiplicador de neutrones. Normalmente, se utilizan Be o Pb [100,109]. Estudiamos Be como multiplicador de neutrones debido a su gran sección eficaz para reacciones (n, 2n). Se necesitan algunas precauciones porque el Be es un material tóxico y presenta riesgos (manipulación, hinchamiento, deformación del pellet y captura de tritio). Su rendimiento puede mejorarse utilizando óxido de berilio (BeO), que aumenta aún más cuando se mezcla en compuestos con Li_2TiO_3 , este nuevo compuesto mixto (BeO- Li_2TiO_3) exhibe una mejor conductividad térmica y estabilidad mecánica [101,102]. En este capítulo, con la experiencia descrita en [107], hemos preferido realizar los cálculos con placas metálicas de berilio, insertadas en la cerámica. Este diseño aporta versatilidad, evita la interacción química entre las placas y la cerámica, ya que ambos materiales están completamente separados por materiales estructurales, y el uso de placas permite una interesante optimización del TBR al poderlas colocar estratégicamente donde el flujo neutrónico es lo suficientemente alto para maximizar el número de reacciones (n, 2n) con Be (maximizando así la producción de tritio).

4.3.3 Materiales estructurales.

En esta sección consideramos el papel de los materiales estructurales. En nuestro diseño (Figura 4.2), constituyen la estructura de la cámara y además el material del tubo para los pellets cerámicos (sección 4.4). Por simplicidad, utilizamos tres materiales convencionales: (i) **Zircaloy-2**, una aleación resistente a la corrosión con una sección eficaz de absorción pequeña para neutrones, y ampliamente utilizada para barras de combustible en reactores de fisión [70,90]; (ii) **Eurofer-97**, un acero de baja activación diseñado específicamente para instalaciones de fusión [71,118]; (iii) el conocido **acero 316-L**, un acero inoxidable austenítico de uso general muy extendido en la industria [42]. La densidad del acero Eurofer-97 es de 7.798 g/cm^3 [119], y la composición química se reporta en varios artículos. El rango de temperaturas operativas para estos materiales es $\sim 600 - 850 \text{ K}$ [120] con la excepción de algunos conceptos [109], sin embargo, en nuestro concepto los materiales estructurales no superarán esos límites. El uso del acero está limitado a temperaturas de aproximadamente 823 K [121]. en un TBM, varios informes concluyen cambios evidentes en la microestructura de los aceros ferríticos-martensíticos, como reacciones carbídicas, engrosamiento del grano y fragilización de los límites del grano en el rango de $823\text{-}923 \text{ K}$ [121]. Por otro lado en Ref. [122] se describe el comportamiento termomecánico de los revestimientos de Zircaloy-4. Asumiendo que este material posee un comportamiento muy similar al Zircaloy-2 (que contiene Ni al 0,0005%

en peso.), se puede concluir que el Zircaloy presenta transiciones complejas en su microestructura relacionadas con una transformación de fase alotrópica ($\alpha \rightarrow \beta$) entre 1023- 1223 K al calentar de manera constante [122]. En este mismo rango de temperatura el Zircaloy presenta una reacción exotérmica de oxidación por lo que su utilización no sería recomendable. Suponemos que este comportamiento complejo no estará presente en un TBM con una ventana operativa normal o típica. Las densidades y la composición química (Tabla 4.2) del Zircaloy-2 y el Acero 316-L se reportan en [123], y sus propiedades termomecánicas en [71,124–126].

Tabla 4.2. Composición elemental (en fracción de peso) de los materiales estructurales utilizados en este trabajo.

Material estructural	Elemento	Fracción en peso
Eurofer-97	C	0.001
	Cr	0.09
	W	0.011
	V	0.002
	Ta	0.1199
	Mn	0.004
	Fe	0.89
Acero 316-L	C	0.0003
	Si	0.01
	P	0.00045
	S	0.0003
	Cr	0.17
	Mn	0.02
	Fe	0.6539
	Ni	0.12
	Mo	0.025
Zircaloy-2	O	0.006796
	Cr	0.001743
	Fe	0.001623
	Ni	0.000772
	Zr	0.978381
	Sn	0.010686

4.3.4 Reflectores Neutrónicos.

El reflector neutrónico es un elemento esencial de nuestro concepto de manto con TBR variable (Figura 4.1). Gracias a este elemento, una pequeña fracción de neutrones de baja energía (que no transportan más del 1% de la energía del neutrón primario para cumplir con el requisito vii, Sección 4.3.1) se puede controlar a voluntad, ya sea haciéndolos regresar al manto para obtener el máximo TBR posible o dejándolos escapar del manto para obtener el menor TBR posible. Las propiedades reflectantes del reflector deben poderse variar de una manera sencilla para modificar fácilmente el TBR durante el funcionamiento de la planta. La mejor solución es un tanque de agua. Según nuestros cálculos, capítulo 3 [107], como era de esperar, el agua pesada es la opción más eficiente debido a su baja sección eficaz para absorción de neutrones. Sin embargo, también se podría utilizar agua ligera.

Los reflectores sólidos considerados (plomo y grafito) presentan tanto rendimientos inferiores a los tanques de agua como una mayor complejidad técnica a la hora de variar sus propiedades de reflexión. Por tanto, se ha descartado su utilización.

4.4 Montaje de las cerámicas: consideraciones termomecánicas

Los cálculos neutrónicos reportados en el capítulo 3 [107] nos proporcionaron evidencias sobre la viabilidad de diseñar un manto reproductor con la capacidad de modular el TBR durante la operación de la planta gracias al uso de un reflector neutrónico variable. Sin embargo, y debido a la gran cantidad de incertidumbres que afectan al diseño, debemos abordar otros aspectos. En esta sección, discutimos las consideraciones termomecánicas. Dado que los diseños de ingeniería detallados son demasiado prematuros para el nivel de desarrollo de nuestro concepto, hemos considerado un diseño conceptual simplificado para plantas de energía por fusión inercial con blanco directo, basados en la descripción de la cámara de reacción de la Sección 4.2 (Figura 4.1) y la discusión de materiales de la Sección 4.3. La Figura 4.2(a) muestra esquemáticamente una forma de incorporar pellets cerámicos al manto, encerrándolos en tubos hechos de un material estructural. Además, consideramos un sistema de enfriamiento sencillo con extracción de tritio asistida por purga de He, Figura 4.2(c). La disposición de los tubos debe ser lo más compacta posible para minimizar las dimensiones del manto. La Figura 4.2(d) muestra tal disposición en un corte perpendicular a los ejes principales de los tubos. Además, se indican los flujos de refrigeración del He.

El objetivo final de esta aproximación es identificar un rango de valores adecuado tanto para la densidad del manto como para el volumen material estructural, y de esta forma revisar las consideraciones neutrónicas realizadas en el capítulo anterior.

A pesar de la sencillez de este concepto, se abarcan muchos aspectos necesarios para extraer conclusiones útiles sobre el rendimiento del manto con TBR variable, como se analiza a continuación. Se incluye una cámara sujeta a condiciones de irradiación, dimensiones y una elección de materiales lo más realista posible, así como consideraciones sobre enfriamiento y extracción de tritio.

Para estimar la temperatura máxima que alcanzarán los pellets, consideramos un tubo aislado de radio externo R , radio interno r y espesor de pared del tubo d , (así, $R = r + d$), que contiene pellets cerámicos porosos (con una densidad 20% menor que la densidad nominal) para permitir la liberación efectiva de tritio (Sección 4.3). Los principales parámetros cerámicos se han discutido en la Sección 4.3.1 (Refs. [74,100,112]). Para estos cálculos, necesitamos las propiedades térmicas y la densidad de las cerámicas. Además, necesitamos estimar la densidad de potencia en el manto. Para la cámara de reacción descrita en la Sección 4.2, los cálculos neutrónicos de la siguiente sección proporcionan un valor máximo de la potencia depositada en el manto, es decir, 7.3 MW/m^3 . Utilizando este valor como término fuente de nuestros cálculos termomecánicos podemos estimar, en las condiciones más extremas, los perfiles de temperatura en tubos de diferentes radios.

Figura 4.3. Perfiles de temperatura en función de la distancia radial al centro del tubo, para tubos de Zircaloy-2 con diferentes radios internos, r (entre paréntesis) que contienen pellets cerámicos con una porosidad del 20%, (a) Li_2TiO_3 y (b) Li_8ZrO_6 . El espesor de la pared del tubo es de $d = 0.3$ cm para todos los casos.

La Figura 4.3 muestra los perfiles de temperatura para casos representativos correspondientes a tubos de Zircaloy-2 refrigerados por un flujo de He a 10 m/s con un coeficiente de convección de $275.54 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Los resultados muestran una temperatura máxima relativamente constante en la región central del tubo seguida de una caída de temperatura que varía lentamente a lo largo de la cerámica a medida que aumenta la distancia radial al eje hasta alcanzar el material estructural (pared del tubo). El perfil de temperatura es el esperado para un material con baja conductividad térmica (la cerámica) y con la extracción de calor radial impuesta. La presencia del material estructural se observa claramente por una discontinuidad en el perfil y una caída de temperatura lineal (disipación de calor en estado estacionario) a lo largo de la pared del tubo hasta la temperatura del refrigerante. Esto es característico de materiales con alta conductividad térmica. Debido a la baja conductividad térmica de los materiales cerámicos, los perfiles dependen mucho del radio del tubo. Es posible observar que la temperatura máxima en el centro aumenta al aumentar el radio del tubo. Es decir, cuanto más grandes sean los tubos, más difícil será la disipación de calor. La temperatura del Zircaloy-2 está intrínsecamente ligada a la potencia depositada en el material cerámico y esta a su vez, es función de la densidad, dado que el Li_2TiO_3 es un material con mayor densidad (g/cm^3), de cada cm^2 es

necesario extraer más calor y por lo tanto para la misma convección, la temperatura superficial será mayor. Sin embargo, en la temperatura máxima la conductividad del material juega el papel principal. Dado que la conductividad del Li_8ZrO_6 es casi la mitad de la del Li_2TiO_3 , el Li_8ZrO_6 generará una mayor temperatura. Se pueden extraer dos observaciones importantes de la Figura 4.3. Primero, la temperatura máxima del Zircaloy-2 obtenido para $r = 2$ cm, permanece por debajo de 600 K usando pellets de Li_2TiO_3 y por debajo de 500 K usando pellets de Li_8ZrO_6 . Estas temperaturas están dentro de los límites operativos de los materiales estructurales (Sección 4.3.3). En segundo lugar, la temperatura máxima de operación que impusimos para los pellets, 800 K, como se discutió en la Sección 4.3.1, no se excede para tubos de radio interior $r \leq 1.75$ cm. Por lo tanto, utilizaremos tubos con radio interior $r = 1.75$ cm para los estudios neutrónicos que se analizan en la siguiente sección. La Tabla 4.3 muestra la densidad nominal y densidad de las cerámicas en forma de pellets (con 20% de porosidad) que se montan en tubos de Zircaloy-2 con radio interior de $r = 1.75$ cm y espesor de pared $d = 0.3$ cm. La densidad del “material compuesto” (tubos + pellets + espacio vacío) se indica en la última fila. Las densidades se dan en g/cm^3 (Refs. [74,100,112]). Estas dimensiones de tubo de Zircaloy son muy similares a las utilizadas en los combustibles nucleares de fisión y por tanto son industrialmente viables.

Tabla 4.3. Propiedades del material cerámico y densidad del material equivalente” formado por pellets cerámicos en tubos de zircaloy-2 de radio interno $r = 1.75$ cm y radio externo $R = 2.05$ cm (espesor del tubo $d = 0.3$ cm) y dispuestos de forma compacta como se indica en la Figura 4.2(b).

	Li_2TiO_3	Li_8ZrO_6	Li_4SiO_4
Conductividad térmica a 773 K ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	1.95	1.18	2.4
Densidad nominal	3.43	2.98	2.40
Densidad en el pellet (20% porosidad)	2.74	2.38	1.92
Densidad en el “material equivalente”	3.43	3.19	2.88

4.5 Consideraciones neutrónicas: producción controlada de tritio

Para realizar cálculos neutrónicos, necesitamos conocer la densidad isotópica en cada punto del manto. Haciendo uso de la Figura 4.2(b), podemos estimar la fracción de volumen (en azul) ocupada por los tubos f_{tubo} , la fracción de volumen del espacio vacío

$f_{vacío}$, la fracción de volumen ocupada por el material estructural f_{me} , y la fracción de volumen ocupada por material cerámico f_{cer} . Esto requiere un cálculo geométrico simple utilizando el supuesto de que la celda unitaria se repite a lo largo del manto y que se puede representar mediante el rombo del área $2\sqrt{3}R^2$ mostrado en la Figura 4.2(b). Las fracciones de volumen quedan:

$$\begin{aligned}
 f_{tubo} &= \frac{\pi R^2}{2\sqrt{3}R^2} = 0.91 \\
 f_{vacío} &= \frac{2\sqrt{3}R^2 - \pi R^2}{2\sqrt{3}R^2} = 0.09 \\
 f_{cer} &= f_{tubo} \frac{r^2}{R^2} \\
 f_{me} &= f_{tubo} - f_{cer}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

De esta forma, con la selección de tubos del apartado anterior, obtenemos las siguientes fracciones volumétricas de material cerámico y estructural. Para tubos con $r = 1.75$ cm, $f_{cer} = 0.66$ y $f_{me} = 0.25$. Así, para cada cerámica, podemos calcular la densidad del “material compuesto” formado por los tubos (paredes de material estructural y pellets cerámicos) y el volumen vacío entre tubos (estas densidades se muestran en la Tabla 4.3). Finalmente, para los cálculos neutrónicos damos un paso adelante y estimamos las densidades isotópicas de cada isótopo en los “materiales compuestos”. Realizamos los cálculos neutrónicos sobre cada “material compuesto” como si fueran bloques homogéneos de dimensiones determinadas. Esta aproximación nos conduce a ignorar algunos efectos que desde el punto de vista del blindaje pueden ser relevantes (e.g. el streaming en los huecos de vacío) pero que resultan de segundo orden de cara a la producción de tritio, y en el nivel actual de desarrollo, esto constituye una aproximación aceptable.

Figura 4.4. Razón de producción de tritio (a) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor total del manto. Los cálculos se realizaron con tubos de Zircaloy-2 de radio interior $r = 1.75$ cm que contenían pellets de Li_2TiO_3 con una placa de Be de 2.0 ó de 2.5 cm de espesor. El área sombreada indica valores de TBR entre 1.0 y 1.1 con una pérdida de energía $< 1\%$. La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector es un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica.

En la Sección 4.3.1, describimos al Li_2TiO_3 como una cerámica equilibrada con respecto a la lista de requisitos para un material reproductor cerámico. Las principales preocupaciones estaban relacionadas con la liberación de tritio. Estamos considerando cerámicas Li_2TiO_3 porosas al 20% con tamaño de grano pequeño para asegurar una buena liberación de tritio. En la sección 4.4, determinamos la geometría del tubo ($r = 1.75$ cm, $d = 0.3$ cm) para mantener la temperatura máxima de operación de la cerámica por debajo de 800 K. En esta sección, discutimos cómo el Li_2TiO_3 cumple con el requisito (vii) de la Sección 4.3.1 acerca de proporcionar un TBR variable en un rango de $\lesssim 1.0$ a aproximadamente 1.1 con la ayuda de un reflector de neutrones (tanque de agua pesada). La Figura 4.4 muestra que el TBR se puede ajustar en un amplio rango simplemente variando el nivel de llenado del tanque. El área sombreada indica el rango de TBR de 1.0 a 1.1 para una pérdida de energía $< 1\%$. La observación más notable es que los requisitos

de TBR y pérdida de energía (vii) se cumplen para un espesor total del manto de ~ 55 cm. Es decir, cuando el tanque está lleno, el TBR es ~ 1.1 y simplemente vaciarlo conduce a un TBR ~ 1.0 . Con el fin de tener en cuenta que una serie de incertidumbres afectarán a estos resultados, las simulaciones se realizaron con una placa de Be de 2.0 o con una placa de Be de 2.5 cm de espesor para mostrar que se puede obtener un ajuste fino del TBR modificando el espesor de la placa de Be. Por tanto, como discutimos en el capítulo 3 [107] este es un caso exitoso, muy prometedor como punto de partida para un diseño de ingeniería del manto. Para obtener una mejor aproximación en la cría de tritio, se ha colocado el material cerámico dentro de tubos de material estructural. Esta solución facilitará su contención y refrigeración, así como su posible reciclaje. Los cálculos presentados en la Figura 4.5 se realizaron simulando tubos de radio interior $r = 1.75$ cm fabricados con diferentes materiales estructurales que contienen pellets de Li_2TiO_3 y con una placa de Be de 2.0 cm de espesor, insertada al inicio del manto en dirección radial. La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector es un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica

Figura 4.5. Razón de producción de tritio en función del espesor total del manto (a) con reflector (símbolos sólidos) y sin reflector (símbolos huecos) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor del manto.

Figura 4.6. Razón de producción de tritio (a) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor total del manto. Los cálculos se realizaron con tubos de radio interior $r = 1.75$ cm hechos de diferentes materiales estructurales que contenían pellets de Li_2TiO_3 y con diferente número de placas (Tabla 4.1). La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector era un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica.

El uso de Zircaloy-2 como material estructural aporta una clara ventaja desde el punto de vista neutrónico debido a la baja absorción de neutrones de este material. En la Figura 4.5 se muestran tres casos que solo se diferencian en el material de los tubos: Zircaloy-2, Acero 316-L y Eurofer-97. En los tres casos se hizo uso de una placa de Be de 2 cm de espesor, sin embargo, solo en el caso del Zircaloy-2 (que se acaba de discutir anteriormente) cumple con los requisitos para un manto con TBR variable. Los otros materiales estructurales conducen a una reducción significativa en los niveles de TBR y, además, se produce una reducción en el rango de variación del TBR (tanque lleno / vacío). Se pueden añadir placas de Be adicionales para aumentar el TBR en los casos en que no se emplea Zircaloy-2, compensando así la absorción de neutrones por los otros materiales estructurales. Incrementamos el número de placas y a pesar de las complicaciones de agregar placas adicionales, conseguimos mejorar los resultados, como se muestra en la

Figura 4.6. Para el caso basado en tubos de acero 316 L, cuando el espesor total del material cerámico (poroso) es de 50 cm y se usan 3 placas de Be, el TBR obtenido cumple con el rango deseado (1.0 – 1.1 para tanque lleno / vacío) a la vez que la pérdida de energía es <1%. Sin embargo, en el caso de los tubos de Eurofer-97, incluso añadiendo 5 placas de Be, los resultados quedan muy alejados de los requisitos marcados en cuanto a rango de TBR y pérdida máxima de energía (vii). Estos resultados muestran que las soluciones de ingeniería basadas en configuraciones avanzadas podrían proporcionar resultados aceptables, aunque el papel de los materiales es fundamental. Al mismo tiempo, son evidentes los beneficios de usar Zircaloy-2, en particular, en lo que respecta a las necesidades de bajo consumo de Be. Este resultado es esperable dado que la baja sección eficaz de captura del Zr comparado con el Fe o el Ni permite mejorar la economía neutrónica del sistema. Por tanto, diseños basados en tubos hechos de materiales con bajas secciones eficaces para absorción de neutrones son prometedores para el desarrollo de este tipo de mantos.

Figura 4.7. Razón de producción de tritio (a) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor del manto. Los cálculos se realizaron con tubos de radio interior $r = 1.75$ cm hechos de Zircaloy-2 que contenían pellets de Li_8ZrO_6 o Li_4SiO_4 . En estos casos no se utilizaron placas de Be. El área sombreada indica valores de TBR entre 1.0 y 1.1 con una pérdida de energía <1%. La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector es un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica.

Figura 4.8. Razón de producción de tritio (a) y porcentaje de energía neutrónica perdida en el reflector (b) en función del espesor total del manto. Los cálculos se llevaron a cabo con tubos de radio interior $r = 1.75$ cm de Zircaloy-2 o Eurofer-97 rellenos con pellets de Li_8ZrO_6 . Cuando se utiliza placa de Be es de un espesor de 2 cm. La línea horizontal indica una pérdida de energía del 1%. El reflector era un tanque de agua pesada de 2 m de espesor alrededor de la cámara esférica.

Analizamos a continuación el rendimiento de otras dos cerámicas: Li_8ZrO_6 y Li_4SiO_4 . En primer lugar, realizamos cálculos neutrónicos en sistemas que solo se diferenciaban en el material cerámico, es decir, en tubos de Zircaloy-2 con radio interior $r = 1.75$ cm (Figura 4.7). Estos resultados se obtuvieron sin placas de Be. Son muy destacables los altos valores de TBR obtenidos con Li_8ZrO_6 , especialmente considerando la ausencia de multiplicadores neutrónicos en este caso. Como se indica mediante el área sombreada, para un espesor total de material cerámico de ~ 55 cm, el TBR puede variar desde ~ 1.0 (tanque vacío) a ~ 1.2 (tanque lleno), manteniendo la pérdida de energía $\lesssim 1\%$. Un valor de TBR de 1.2 puede parecer demasiado alto y, por tanto, perjudicial debido al exceso de producción de tritio que afecta a los inventarios de tritio. Sin embargo, esto en realidad no es un problema porque el nivel de llenado del tanque se puede cambiar a voluntad para obtener el TBR deseado entre 1.0 y 1.2. En todo caso, ya hemos mencionado que el Li_8ZrO_6 probablemente requerirá el uso de estabilizadores, como Li_5AlO_4 [33,38], lo que

probablemente conducirá a un TBR más bajo. El hecho de que el TBR obtenido sin estas consideraciones sea tan alto, hace que este material sea una opción prometedora incluso considerando que para una aplicación real la composición final con estabilizadores seguramente proporcione valores menores de TBR por diferir con respecto a la composición ideal utilizada en estos cálculos. Por otro lado, el rendimiento de Li_4SiO_4 es claramente peor. Los resultados indican que para un espesor total de material cerámico < 40 cm, la adición de una placa multiplicadora podría aproximar el TBR a los valores requeridos. Sin embargo, la amplitud del rango obtenido es mucho menor que en el caso de Li_8ZrO_6 .

El uso de Li_8ZrO_6 conduce a valores de TBR tan altos que hace posible el uso de tubos Eurofer-97, aunque con el añadido de 5 placas de berilio (Figura 4.8). De hecho, para un espesor de material cerámico de ~ 40 cm, el TBR para tanque lleno-vacío estaría en el rango deseado 1.0 – 1.1. En este caso, la absorción de neutrones en Eurofer-97 contribuye a mantener la pérdida de energía baja. Sin embargo, el uso de Eurofer-97 se ve comprometido por las complicaciones relacionadas con la incorporación de 5 placas de Be, demostrando nuevamente, el desempeño superior de los tubos Zircaloy-2, que en este caso pueden operar sin ninguna placa de Be.

Figura 4.9. Tasa de dosis de contacto por unidad de volumen para un manto con pellets de Li_2TiO_3 encapsulados en tubos de Zircaloy-2 (radio interior $r = 1.75$ cm). El espesor total del manto es de 55 cm. Como multiplicador de neutrones se utiliza una placa Be de 2 cm de espesor. La línea horizontal indica el límite de manipulación remota (1 mSv / h) para 1 m^3 de manto.

4.6 Activación del manto.

En este apartado se discute la activación del manto reproductor, para tres materiales estructurales en sus casos más prometedores entre las opciones estudiadas, es decir, un manto con un espesor cerámico total (pellets de Li_2TiO_3) de 55 cm en tubos de Zircaloy-2 con radio interior $r = 1.75$ cm, espesor de pared $d = 0.3$ cm y con una placa de berilio (Figura 4.4). Las condiciones de irradiación son las de la cámara de reacción descrita en la Sección 4.3 para operar en una planta de fusión inercial con una potencia nominal de 1540 MW y durante un año de irradiación. La Figura 4.9 muestra las tasas de dosis de contacto por unidad de volumen considerando Zircaloy-2 como material estructural. La dosis depende en gran medida de los isótopos ^{89}Y y ^{95}Zr , tanto por su actividad como por el largo tiempo de decaimiento. Es interesante destacar que en menos de un año se alcanzaría el límite de manipulación remota (línea horizontal) por lo que sería posible reciclar el manto mediante equipos apropiados de manipulación remota. Es decir, se trata de un comportamiento que permite una correcta gestión de residuos, compatible con la posible necesidad de cambiar frecuentemente (cada 1 ó 2 años) la cámara completa ante la falta de materiales capaces de resistir el deterioro generado por las descargas de plasma y los neutrones rápidos.

El Eurofer-97 (Figura 4.10) posee tres isótopos (^{54}Mn , ^{59}Fe y ^{47}Ca) con grandes periodos de actividad. Se tardaría en todo caso menos de 10 años en alcanzar el límite de manipulación remota. La actividad del acero 316-L (Figura 4.11) es la menor de los tres materiales, siendo los isótopos (^{47}Ca y ^{51}Cr) los que marcan su decaimiento característico. En este caso, en menos de seis meses se alcanzaría el límite de manipulación remota. Con la selección de esta cerámica (Li_2TiO_3) y con estos materiales estructurales, es posible reciclar todo el volumen del manto en menos de 100 años.

Figura 4.10. Tasa de dosis de contacto por unidad de volumen para un manto con pellets de Li_2TiO_3 encapsulados en tubos de Eurofer-97 (radio interior $r = 1.75$ cm). El espesor total del manto es de 55 cm. Como multiplicador de neutrones se utiliza una placa Be de 2 cm de espesor. La línea horizontal indica el límite de manipulación remota (1 mSv / h) para 1 m^3 de manto.

Figura 4.11. Tasa de dosis de contacto por unidad de volumen para un manto con pellets de Li_2TiO_3 encapsulados en tubos de acero 316-L (radio interior $r = 1.75$ cm). El espesor total del manto es de 55 cm. Como multiplicador de neutrones se utiliza una placa Be de 2 cm de espesor. La línea horizontal indica el límite de manipulación remota (1 mSv / h) para 1 m^3 de manto.

La Figura 4.11 muestra el inventario al utilizar acero 316L como material estructural. La ausencia de isótopos pesados derivados de las reacciones de captura en el Ta y W presentes en el Eurofer 97 hace que los tiempos de enfriamiento hasta alcanzar el límite de mantenimiento remoto sean considerablemente inferiores. A medio plazo, la mayor parte de la activación se produce por la generación de Co-60. Este isótopo se produce como consecuencia de una reacción de captura en el Co-59, presente en el material como una impureza del Ni.

4.7 Extracción de calor

Realizamos aquí un análisis térmico simplificado de un manto reproductor con pellets de Li_2TiO_3 y de Li_8ZrO_6 en tubos de Zircalloy-2 de radio interior $r = 1.75$ cm y espesor de pared $d = 0.3$ cm (como en la sección anterior) en una configuración representada esquemáticamente en la Figura 4.2(c) y formada por un máximo de 13 tubos alineados en la dirección radial (aproximadamente 55 cm en total). Los cálculos neutrónicos proporcionan la potencia depositada a lo largo del manto y en base a ello se hace un balance de energía para evaluar el incremento de temperatura que sufrirá el refrigerante al recorrer el manto introduciendo el helio a 300 K de modo que refrigere primero los tubos con mayor aporte térmico.

Figura 4.12. (a) Energía depositada por el flujo de neutrones en un manto con un espesor total de 55 cm con pellets cerámicos de Li_2TiO_3 o Li_8ZrO_6 en tubos de zircalloy-2. Bajo estos parámetros es posible alojar hasta 13 tubos con un diámetro externo de 4.1 cm en la configuración mostrada en la Figura 4.2 (c). (b) Temperatura estacionaria de cada tubo en un manto refrigerado por helio.

La Figura 4.12(a) muestra la potencia recibida por cada tubo. Debido a su proximidad a la fuente de neutrones, la energía depositada en los primeros tubos es mayor que la depositada en los últimos, como se esperaba. Por otro lado, el último tubo recibe potencia adicional debido a los neutrones reflejados desde el tanque reflector (si está lleno). En la Figura 4.12(b) se muestra la temperatura del helio refrigerante (que entra a 300 K, a 8 MPa y con una velocidad de 10 m/s) al pasar por cada uno de los tubos en dirección radial. Se han seleccionado condiciones de refrigeración relativamente agresivas, en especial en el caso de la presión, pero compatibles con la resistencia mecánica de las barras de Zircaloy. No obstante, los resultados de incremento de temperatura en el helio, Figura 4.12(b), muestran que el diseño sería compatible con presiones de entrada significativamente inferiores (~2-3 MPa). El helio más frío pasa primero por los tubos más calientes. Así, con las condiciones indicadas en la figura, se produce un aumento de temperatura del refrigerante inferior a 100 K para ambas cerámicas, lo que da mucho margen para optimización de parámetros con el objetivo de conseguir las temperaturas deseadas en la cerámica y en el fluido saliente.

El análisis térmico comienza con el flujo másico del refrigerante helio a través de las barras esto es $\dot{m} = (A)(V_{He})(\rho_{He})$. La cantidad de calor producida en cada barra es considerada en $\frac{Q_{cer}}{\bar{Q}} = \frac{\rho_{cer}}{\bar{\rho}}$ y $\frac{Q_{zirc}}{\bar{Q}} = \frac{\rho_{zirc}}{\bar{\rho}}$, por lo tanto, de cada relación obtenemos $Q_{cer} = \frac{\rho_{cer}}{\bar{\rho}} \bar{Q}$ y $Q_{zirc} = \frac{\rho_{zirc}}{\bar{\rho}} \bar{Q}$ respectivamente y considerando la cantidad de material en cada barra se obtiene $Q_{cer} = V_{cer} \cdot \rho_{cer}$ y $Q_{zirc} = V_{zirc} \cdot \rho_{zirc}$, ahora considerando el calor específico de helio en condiciones de operación de entrada (300 K, 8 MPa y 10 m/s) se tiene que $T_2 = \frac{2(\dot{Q}_{cer} + \dot{Q}_{zirc})}{m_{He} + C_{p He}} + T_1$, esta es la temperatura del helio en la vecindad de las barras. Esta temperatura es iterada para cada barra tomando en cuenta la potencia (W/m³) que disipa cada barra en función de su posición radial desde la fuente neutrónica (potencia de las barras calculada por MCNP). A medida que el helio cruza por las barras se calienta. Este calentamiento se tiene en cuenta en la Figura 4.12, en donde se puede observar en (a) la potencia que disipa cada barra en función de la distancia, para las dos cerámicas distintas,. En (b) se observa la temperatura estacionaria de cada barra después de que hayan sido refrigeradas por el helio en condiciones típicas de entrada para un manto cerámico.

Figura 4.13. Temperatura en dirección radial en cada uno de los tubos de Zircaloy-2 con radio interior $r = 1.75$ cm y espesor de pared $d = 0.3$ cm, rellenos con pellets de Li_2TiO_3 y en contacto directo con el helio refrigerante.

La Figura 4.13 es una figura complementaria de la Figura 4.12 y muestra, por último, la temperatura interna de los tubos del 1 al 13, siendo el tubo 1 el más cercano a la fuente de radiación. Incluso en la condición más extrema, el sistema de refrigeración permite mantener las temperaturas en los límites operacionales. El análisis térmico en un manto con Li_2TiO_3 como material cerámico ($\rho_{cer}=2.74$ g/cm³) y camisa de zircaloy-2 con 0.3 cm de espesor, muestra el efecto térmico de la energía cinética y las reacciones producidas por los neutrones a través del espesor del manto para cada una de la barras o tubos, producto de la reacción primaria D-T. La potencia se deposita en las barras en función de la distancia de la fuente y su volumen.

4.8 Conclusiones

A fin de buscar soluciones a las incertidumbres existentes en todo el ciclo de tritio para las futuras plantas de fusión, se ha estudiado un concepto de manto reproductor para

plantas de fusión inercial basado en cerámicas de litio natural como material activo colocadas en forma de pellets dentro de tubos de distintos materiales estructurales y con placas de Be como material multiplicador de neutrones. La clave de este concepto es un tanque de agua para dejar pasar o reflejar neutrones, lo que permite variar en tiempo real el TBR. Tras discutir el gran abanico de materiales disponibles, los requerimientos funcionales y las posibilidades reales, se ha mostrado un caso de éxito con Li_2TiO_3 en tubos de zircaloy-2 y una placa de Be. Se observa que existe una ventana operacional en la cual con tan solo llenar o vaciar un tanque de agua pesada se consigue variar el TBR entre 1.0 y 1.1 manteniendo la pérdida de energía de los neutrones al tanque $<1\%$. Otros parámetros relevantes como la activación o la extracción de tritio y calor se han tratado de forma preliminar, con resultados prometedores en ambos casos.

El análisis realizado muestra que con otros materiales estructurales esto no es posible o requiere un aumento poco práctico en el número de placas de Be. Así, el zircaloy-2 (bien conocido en aplicaciones nucleares) resulta ser una opción muy interesante debido a su baja sección eficaz para absorción de neutrones en relación con los otros materiales estructurales utilizados. También se ha estudiado una cerámica prometedora, el Li_8ZrO_6 que montada en tubos de zircaloy-2, de acuerdo con nuestros cálculos, permite variar el TBR en el rango adecuado sin necesidad de añadir placas multiplicadoras de Be. Existe un gran margen de mejora hasta lograr un diseño final, robusto, funcional, duradero y económico, sin embargo, los resultados presentados en esta tesis indican que esta propuesta de manto reproductor con TBR variable puede ser la solución para sobrellevar los problemas derivados con las incertidumbres en el ciclo del tritio.

5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

La presente tesis aborda las dificultades existentes en el campo de la fusión nuclear al tratar de diseñar un manto reproductor de tritio, debido a las incertidumbres existentes sobre el ciclo del tritio, así como, las necesidades variables de tritio a lo largo del tiempo de vida de una planta de potencia. Esta tesis propone un diseño original de manto reproductor con capacidad para variar durante operación la cría de tritio (TBR variable) para una planta de fusión laser por confinamiento inercial. El manto está rodeado por un tanque de agua que actúa como reflector variable de neutrones. Así, cuando está vacío deja escapar los neutrones que le llegan, mientras que cuando está lleno los refleja de nuevo hacia la cerámica reproductora. Variando el nivel de llenado se puede variar de forma sencilla el TBR actuando sobre los neutrones que tras depositar la mayor parte de su energía en el manto (en promedio el 99%) escapan hacia el reflector. Se han abordado aspectos cualitativos y cuantitativos tanto acerca de los materiales estructurales como de los materiales cerámicos para cría del tritio utilizados en este diseño de manto. Las conclusiones más importantes que pueden extraerse de esta tesis se resumen a continuación:

1. Se ha propuesto un diseño conceptual original de manto reproductor basado en cerámicas de litio con multiplicadores de berilio y un tanque de agua pesada para actuar como reflector de neutrones. De acuerdo a cálculos neutrónicos este sistema es capaz de modificar el TBR durante operación de forma sencilla entre 1.0 y 1.1 a la vez que permite absorber el 99% de la energía de los neutrones.

2. En el diseño propuesto no es necesario enriquecer el litio, lo cual supone una ventaja adicional sobre propuestas anteriores. Sin embargo, esto exige en la mayoría de los casos usar multiplicadores de neutrones. Se pueden usar reflectores de agua ligera, sin embargo, como es de esperar, el agua pesada proporciona mejores resultados.
3. Distintos aspectos, como geometría y particularmente una buena selección de materiales, permiten optimizar parámetros.
4. Una aproximación más realista basada en el uso de Zircaloy-2 como material estructural, placas de Be metálico y un reflector de agua pesada, permiten usar varias cerámicas como material de cría cumpliendo con los requisitos del manto de TBR variable.
5. Respecto a los materiales cerámicos, el manto, puede funcionar con los conocidos Li_2TiO_3 y Li_4SiO_4 con grano fino y usando multiplicadores de Be. Se ha estudiado un material más novedoso como es el Li_8ZrO_6 con unos resultados espectaculares pues de acuerdo a los cálculos este material no requiere multiplicador de neutrones. Sin embargo, es necesario realizar más estudios acerca del comportamiento de este material en circunstancias realistas.
6. En cuanto a los materiales estructurales, la opción de zircaloy-2 es con diferencia la mejor por ser muy transparente a neutrones al contrario de lo que ocurre con diversos aceros comunes, lo que irremediablemente da lugar a una disminución en la producción de tritio.
7. Los estudios realizados sobre extracción de calor y activación del manto muestran buenos resultados, lo cual, resulta prometedor para profundizar en el estudio de la opción de manto propuesta en esta tesis.

5.2 Trabajo futuro

Los prometedores resultados obtenidos en esta tesis constituyen la base de un posible nuevo concepto de manto reproductor con capacidad de modificar la producción de tritio durante operación. Numerosos estudios deberán llevarse a cabo para aproximar el concepto descrito en esta tesis a un diseño de ingeniería para ser probado en instalaciones realistas:

1. La falta de detalle en la modelización puede generar grandes incertidumbres por lo que será necesario desarrollar modelos que contemplen una mayor cantidad de

elementos estructurales en geometrías realistas tanto de la cámara de reacción como del manto, por ejemplo, elementos para el confinamiento y extracción del tritio, así como canales de inyección del refrigerante.

2. Es necesario una modelización termohidráulica completa que considere las temperaturas alcanzadas en el manto (material cerámico, estructural y refrigerante) y que permita analizar la eficiencia térmica, la velocidad y pérdida de presión en el refrigerante y en el gas de purga, así como también el estrés termomecánico al que se somete al manto en un estado de operación continua.
3. Será necesario llevar a cabo campañas de irradiación realistas sobre prototipos con neutrones de 14 MeV para estudiar tanto los materiales cerámicos como los materiales estructurales y que permitan validar los modelos desarrollados con impurezas en los materiales, puesto que estas impurezas son las causantes principales de elevar la actividad en los materiales.
4. El campo de los materiales requiere una especial atención, en particular lo relativo al desarrollo de materiales cerámicos nanoestructurados con alta densidad de litio, baja porosidad cerrada, alta porosidad abierta y que conserven su integridad estructural (baja evaporación de litio, resistencia al hinchamiento y con baja tasa de pulverización) en un rango de temperaturas amplio, que permita el redimensionamiento y disminución de materiales estructurales, puesto que estos últimos disminuyen el flujo neutrónico y por tanto la eficiencia y capacidad del manto en la cría de tritio.

Referencias

- [1] L. Giancarli, V. Chuyanov, M. Abdou, M. Akiba, B.G. Hong, R. Lässer, C. Pan, Y. Strebkov, Breeding Blanket Modules testing in ITER: An international program on the way to DEMO, *Fusion Engineering and Design*. 81 (2006) 393–405.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.08.096>.
- [2] J. G. van der Laan, *Comprehensive Nuclear Materials*, 1st Ed., Elsevier Science, 2012.
- [3] L.A. El-Guebaly, Fifty Years of Magnetic Fusion Research (1958–2008): Brief Historical Overview and Discussion of Future Trends, *Energies*. 3 (2010) 1067–1086. <https://doi.org/10.3390/en30601067>.
- [4] The ITER project, (n.d.). <https://www.iter.org/> (accessed February 12, 2020).
- [5] The ITER project, (n.d.). <https://www.iter.org/newsline/-/3294?fbclid=IwAR0Dsb3PZnr0tlQ-aCdwsgibKtvO96ZJPhrE7jA4eayfBFC8b3ZL0mzl-F8> (accessed February 12, 2020).
- [6] L. Giancarli, V. Chuyanov, M. Abdou, M. Akiba, B.G. Hong, R. Lässer, C. Pan, Y. Strebkov, Test blanket modules in ITER: An overview on proposed designs and required DEMO-relevant materials, *Journal of Nuclear Materials*. 367–370 (2007) 1271–1280. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.03.234>.
- [7] M.E. Sawan, M.A. Abdou, Physics and technology conditions for attaining tritium self-sufficiency for the DT fuel cycle, *Fusion Engineering and Design*. 81 (2006) 1131–1144. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.07.035>.
- [8] O.A. Hurricane, D.A. Callahan, D.T. Casey, P.M. Celliers, C. Cerjan, E.L. Dewald, T.R. Dittrich, T. Döppner, D.E. Hinkel, L.F.B. Hopkins, J.L. Kline, S. Le Pape, T. Ma, A.G. MacPhee, J.L. Milovich, A. Pak, H.-S. Park, P.K. Patel, B.A. Remington, J.D. Salmonson, P.T. Springer, R. Tommasini, Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion, *Nature*. 506 (2014) 343–348.
<https://doi.org/10.1038/nature13008>.
- [9] D. Clery Nov. 23, 2020, 10:45 Am, Laser fusion reactor approaches ‘burning plasma’ milestone, *Science | AAAS*. (2020).
<https://scihub.wikicn.top/https://www.sciencemag.org/news/2020/11/laser-fusion-reactor-approaches-burning-plasma-milestone> (accessed November 24, 2020).
- [10] China’s “artificial sun” sets world record with 100 second steady-state high performance plasma, (n.d.). <https://phys.org/news/2017-07-china-artificial-sun-world-steady-state.html> (accessed November 25, 2020).

- [11] UK atomic energy authority, Culham Center for Fusion Energy. (n.d.). <https://ccfe.ukaea.uk/> (accessed February 12, 2020).
- [12] UK atomic energy authority, Culham Center for Fusion Energy. (n.d.). <https://ccfe.ukaea.uk/new-jet-programme-will-be-crucial-to-future-of-fusion-research/?fbclid=IwAR3tInd1558noxS4T0zP0twjWRbF5RZEAlModEhMM9VD0dT4KE318eSfPz8> (accessed February 12, 2020).
- [13] R.J. Hawryluk, H. Zohm, The challenge and promise of studying burning plasmas, *Physics Today*. 72 (2019) 34–40. <https://doi.org/10.1063/PT.3.4363>.
- [14] S. Hahn, K. Kim, K. Kim, X. Hu, T. Painter, I. Dixon, S. Kim, K.R. Bhattacharai, S. Noguchi, J. Jaroszynski, D.C. Larbalestier, 45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet, *Nature*. 570 (2019) 496–499. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1293-1>.
- [15] Plasma Science and Fusion Center Massachusetts Institute of Technology, (n.d.). <http://www.psfc.mit.edu/sparc> (accessed February 12, 2020).
- [16] JASON, “TRITIUM”, The MITRE Corporation, 7515 Colshire Drive, McLean, Virginia, Contacto: D.McMorrow-dmcmorrow@mitre.org (Noviembre del 2011)., (n.d.).
- [17] M. Kovari, M. Coleman, I. Cristescu, R. Smith, Tritium resources available for fusion reactors in the long term, (n.d.) 20.
- [18] M. Abdou, N.B. Morley, S. Smolentsev, A. Ying, S. Malang, A. Rowcliffe, M. Ulrickson, Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO, *Fusion Engineering and Design*. 100 (2015) 2–43. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.07.021>.
- [19] L.A. El-Guebaly, S. Malang, Toward the ultimate goal of tritium self-sufficiency: Technical issues and requirements imposed on ARIES advanced power plants, *Fusion Engineering and Design*. 84 (2009) 2072–2083. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.12.098>.
- [20] M.A. Abdou, E.L. Vold, C.Y. Gung, M.Z. Youssef, K. Shin, Deuterium-Tritium Fuel Self-Sufficiency in Fusion Reactors, *Fusion Technology*. 9 (1986) 250–285. <https://doi.org/10.13182/FST86-A24715>.
- [21] L. El-Guebaly, A. Jaber, L. Mynsberge, ARIES-ACT Team, State-of-the-Art 3-D Assessment of Elements Degrading TBR of ARIES-ACT SiC/LiPb Blanket, *Fusion Science and Technology*. 64 (2013) 582–586. <https://doi.org/10.13182/FST13-A19155>.
- [22] S. Zheng, D.B. King, L. Garzotti, E. Surrey, T.N. Todd, Fusion reactor start-up without an external tritium source, *Fusion Engineering and Design*. 103 (2016) 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.11.034>.

- [23] L. Morgan, J. Pasley, Tritium breeding control within liquid metal blankets, *Fusion Engineering and Design*. 88 (2013) 107–112.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2012.11.011>.
- [24] L. El-Guebaly, S. Malang, Need for Online Adjustment/Control of Tritium Bred in Blanket, (n.d.) 3.
- [25] Mc Cracken, *Fusion*, 2da ed., n.d.
- [26] M. Ni, Tritium supply assessment for ITER and DEMONstration power plant, *Fusion Engineering and Design*. (2013) 6.
- [27] M. Kovari, M. Coleman, I. Cristescu, R. Smith, Tritium resources available for fusion reactors, *Nucl. Fusion*. 58 (2018) 026010. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa9d25>.
- [28] M.A. ABDOU, N.B. MORLEY, A.Y. YING, C.P.C WONG, R. KURTZ, M. SAWAN,, B. MERRILL, Y. KATOH, S. MALANG, M. YOUSSEF, S. SMOLENTSEV, D.K. SZE AND THE US ITER TEST BLANKET MODULE TEAM, WORKSHOP ON THE ROLE OF THE ITER TBM IN FUSION NUCLEAR TECHNOLOGY DEVELOPMENT ORNL, MAY 30 – JUNE 1, 2007ANSWERS TO SPECIFIC TECHNICAL, PROGRAMMATIC, AND LOGISTICAL QUESTIONS, (n.d.).
- [29] M. Dunne, E.I. Moses, P. Amendt, T. Anklam, A. Bayramian, E. Bliss, B. Debs, R. Deri, T.D. de la Rubia, B. El-Dasher, J.C. Farmer, D. Flowers, K.J. Kramer, L. Lagin, J.F. Latkowski, J. Lindl, W. Meier, R. Miles, G.A. Moses, S. Reyes, V. Roberts, R. Sawicki, M. Spaeth, E. Storm, Timely Delivery of Laser Inertial Fusion Energy (LIFE), *Fusion Science and Technology*. 60 (2011) 19–27.
<https://doi.org/10.13182/FST10-316>.
- [30] A. Bayramian, S. Aceves, T. Anklam, K. Baker, E. Bliss, C. Boley, A. Bullington, J. Caird, D. Chen, R. Deri, M. Dunne, A. Erlandson, D. Flowers, M. Henesian, J. Latkowski, K. Manes, W. Molander, E. Moses, T. Piggott, S. Powers, S. Rana, S. Rodriguez, R. Sawicki, K. Schaffers, L. Seppala, M. Spaeth, S. Sutton, S. Telford, Compact, Efficient Laser Systems Required for Laser Inertial Fusion Energy, *Fusion Science and Technology*. 60 (2011) 28–48.
<https://doi.org/10.13182/FST10-313>.
- [31] J.F. Latkowski, R.P. Abbott, S. Aceves, T. Anklam, D. Badders, A.W. Cook, J. DeMuth, L. Divol, B. El-Dasher, J.C. Farmer, Chamber design for the laser inertial fusion energy (LIFE) engine, *Fusion Science and Technology as Part of the Proceedings of the Nineteenth Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE)*, Vol. 60, No. 1, July 1, 2011, Pp. 54-60. (2010).
<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/1028880/> (accessed February 6, 2013).
- [32] HiPER_Preparatory_Phase_Completion_Report.pdf, (n.d.).

- [33] J.M. Perlado, J. Sanz, J. Alvarez, D. Cereceda, S. Cuesta, S. Courtin, E. del Rio, J. Fernández, A. Fraile, D. Garoz, N. Gordillo, C. Guerrero, R. Gonzalez-Arrabal, N. Moral, R. Juarez, F. Ognissanto, A. Rivera, C. Sánchez, R. Suarez, M. Victoria, C. Edwards, J. Collier, M. Tyldesley, M. Tolley, D. Neely, B. Rus, B. Le Garrec, G. Schurtz, S. Sanders, IFE plant technology overview and contribution to HiPER proposal, in: J. Hein, L.O. Silva, G. Korn, L.A. Gizzi, C. Edwards (Eds.), Prague, Czech Republic, 2011: p. 80801Z. <https://doi.org/10.1117/12.891266>.
- [34] B. Le Garrec, M. Novaro, M. Tyldesley, R. Juarez, J. Sanz, M. Perlado, B. Rus, J. Collier, C. Edwards, HiPER laser reference design, SPIE Optics+ Optoelectronics. (2011) 80801V–80801V.
- [35] D. Maisonnier, I. Cook, S. Pierre, B. Lorenzo, D.P. Luigi, G. Luciano, N. Prachai, P. Aldo, DEMO and fusion power plant conceptual studies in Europe, Fusion Engineering and Design. 81 (2006) 1123–1130. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.08.055>.
- [36] D. Garoz, A.R. Páramo, A. Rivera, J.M. Perlado, R. González-Arrabal, Modelling the thermomechanical behaviour of the tungsten first wall in HiPER laser fusion scenarios, Nuclear Fusion. 56 (2016) 126014. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/12/126014>.
- [37] W.R. Meier, A.M. Dunne, K.J. Kramer, S. Reyes, T.M. Anklam, Fusion technology aspects of laser inertial fusion energy (LIFE), Fusion Engineering and Design. (2014). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.12.021>.
- [38] J.D. Lindl, E.I. Moses, Special Topic: Plans for the National Ignition Campaign (NIC) on the National Ignition Facility (NIF): On the threshold of initiating ignition experiments, Physics of Plasmas. 18 (2011) 050901. <https://doi.org/10.1063/1.3591001>.
- [39] R. Juárez, J. Sanz, A.J. Lopez-Revelles, J.M. Perlado, Neutronics and activation of the preliminary reaction chamber of HiPER reactor based in a SCLL blanket, Fusion Engineering and Design. 88 (2013) 2373–2377. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.101>.
- [40] R. Juarez Mañas, J. Sanz Gonzalo, C. Sánchez, C. Zanzi, J. Hernández, P. Martin, Studies of a Self Cooled Lead Lithium blanket for HiPER Reactor, (2011). <http://oa.upm.es/13004/> (accessed May 4, 2016).
- [41] R. Juárez, C. Zanzi, J. Hernández, J. Sanz, Thermo-fluid dynamics and corrosion analysis of a self cooled lead lithium blanket for the HiPER reactor, Nucl. Fusion. 55 (2015) 093003. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/9/093003>.
- [42] N. Baluc, K. Abe, J.L. Boutard, V.M. Chernov, E. Diegele, S. Jitsukawa, A. Kimura, R.L. Klueh, A. Kohyama, R.J. Kurtz, R. Lässer, H. Matsui, A. Möslang, T. Muroga, G.R. Odette, M.Q. Tran, B. van der Schaaf, Y. Wu, J. Yu, S.J. Zinkle,

- Status of R&D activities on materials for fusion power reactors, *Nucl. Fusion*. 47 (2007) S696–S717. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/10/S18>.
- [43] S. Atzeni, Inertial Confinement Fusion with Advanced Ignition Schemes: Fast Ignition and Shock Ignition, in: P. McKenna, D. Neely, R. Bingham, D. Jaroszynski (Eds.), *Laser-Plasma Interactions and Applications*, Springer International Publishing, Heidelberg, 2013: pp. 243–277. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00038-1_10.
- [44] S. Atzeni, C. Bellei, J.R. Davies, R.G. Evans, J.J. Honrubia, P. Nicolai, X. Ribeyre, G. Schurtz, A. Schiavi, J. Badziak, Fast ignitor target studies for HiPER, *Journal of Physics: Conference Series*. 112 (2008) 022062.
- [45] J.J. Honrubia, J. Meyer-ter-Vehn, Fast ignition of fusion targets by laser-driven electrons, *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 51 (2008) 014008.
- [46] B. Canaud, M. Temporal, High-gain shock ignition of direct-drive ICF targets for the Laser Mégajoule, *New Journal of Physics*. 12 (2010) 043037. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/12/4/043037>.
- [47] X. Ribeyre, M. Lafon, G. Schurtz, M. Olazabal-Loumé, J. Breil, S. Galera, S. Weber, Shock ignition: modelling and target design robustness, *Plasma Phys. Control. Fusion*. 51 (2009) 124030. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/12/124030>.
- [48] X. Ribeyre, G. Schurtz, M. Lafon, S. Galera, S. Weber, Shock ignition: an alternative scheme for HiPER, *Plasma Phys. Control. Fusion*. 51 (2009) 015013. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/1/015013>.
- [49] D. Garoz, R. González-Arrabal, R. Juárez, J. Álvarez, J. Sanz, J.M. Perlado, A. Rivera, Silica final lens performance in laser fusion facilities: HiPER and LIFE, *Nuclear Fusion*. 53 (2013) 013010. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/1/013010>.
- [50] A. Jolodosky, K. Kramer, W. Meier, J. DeMuth, S. Reyes, M. Fratoni, Neutronics and activation analysis of lithium-based ternary alloys in IFE blankets, *Fusion Engineering and Design*. 107 (2016) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.03.071>.
- [51] A.R. Páramo, F. Sordo, J.M. Perlado, A. Rivera, Viability of the ESS-Bilbao neutron source for irradiation of nuclear fusion materials, *Journal of Nuclear Materials*. 444 (2014) 469–474. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.10.014>.
- [52] A.J. Rivera de Mena, D. Garoz Gómez, R. Juárez Mañas, J. Alvarez Ruiz, R. Gonzalez Arrabal, P. Martin, J. Manuel, Lifetime of silica final lenses subject to HiPER irradiation conditions, (2011). http://oa.upm.es/12621/2/INVE_MEM_2011_106742.pdf (accessed February 6, 2013).

- [53] J. Alvarez, A. Rivera, R. Gonzalez-Arrabal, D. Garoz, E. del Rio, J.M. Perlado, Materials Research for Hiper Laser Fusion Facilities: Chamber Wall, Structural Material and Final Optics, *Fusion Sci. Technol.* 60 (2011) 565–569.
- [54] J.T. (prepared by M.L. Watkins), Physics of high performance JET plasmas in DT, *Nucl. Fusion*. 39 (1999) 1227–1244. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/39/9Y/302>.
- [55] H. Weisen, A.C.C. Sips, C.D. Challis, L.-G. Eriksson, S.E. Sharapov, P. Batistoni, L.D. Horton, K.-D. Zastrow, EFDA-JET Contributors, The scientific case for a JET D-T experiment, in: Villa Monastero, Varenna (Lc), Italy, 2014: pp. 77–86. <https://doi.org/10.1063/1.4894028>.
- [56] T.J.T. (presented by M. Keilhacker), Latest JET results in deuterium and deuterium - tritium plasmas, *Plasma Phys. Control. Fusion*. 39 (1997) B1–B18. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/39/12B/002>.
- [57] J. Jacquinot, J. Team, JET results in D-T divertor plasmas, *Nucl. Fusion*. 38 (1998) 1263–1273. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/38/9/301>.
- [58] M. Angelone, P. Batistoni, M. Laubenstein, L. Petrizzi, M. Pillon, Neutronics experiment for the validation of activation properties of DEMO materials using real DT neutron spectrum at JET, *Fusion Engineering and Design*. 81 (2006) 1485–1490. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.09.043>.
- [59] T. Vasilopoulou, I.E. Stamatelatos, P. Batistoni, N. Fonnesu, R. Villari, J. Naish, S. Popovichev, B. Obryk, Activation foil measurements at JET in preparation for D-T plasma operation, *Fusion Engineering and Design*. 146 (2019) 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.038>.
- [60] L. Garzotti, C. Challis, R. Dumont, D. Frigione, J. Graves, E. Lerche, J. Mailloux, M. Mantsinen, F. Rimini, F. Casson, A. Czarnecka, J. Eriksson, R. Felton, L. Frassinetti, D. Gallart, J. Garcia, C. Giroud, E. Joffrin, H.-T. Kim, N. Krawczyk, M. Lennholm, P. Lomas, C. Lowry, L. Meneses, I. Nunes, C.M. Roach, M. Romanelli, S. Sharapov, S. Silburn, A. Sips, E. Stefániková, M. Tsalas, D. Valcarcel, M. Valovič, JET Contributors, Scenario development for D–T operation at JET, *Nucl. Fusion*. 59 (2019) 076037. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cca>.
- [61] M.A. Abdou, N.B. Morley, A.Y. Ying, C.P.C. Wong, T. Mann, S. Tourville, VOLUME I: TECHNICAL PLAN AND COST ESTIMATE SUMMARY, (n.d.) 124.
- [62] J.-L. François, C. Martín-Del-Campo, A. Fierro, Study of the Tritium Breeding Blanket in an Hybrid Fusion–Fission Transmutation System, in: *Proceedings of The 20th Pacific Basin Nuclear Conference*, Springer, Singapore, 2016: pp. 895–903. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2317-0_84.

- [63] S. Şahin, M.J. Khan, R. Ahmed, Fissile fuel breeding and minor actinide transmutation in the life engine, *Fusion Engineering and Design*. 86 (2011) 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.01.002>.
- [64] M.E. Sawan, I.N. Sviatoslavsky, A.R. Raffray, X. Wang, Neutronics Assessment of Blanket Options for the HAPL Laser Inertial Fusion Energy Chamber, in: 21st IEEE/NPS Symposium on Fusion Engineering SOFE 05, IEEE, Knoxville, TN, USA, 2005: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/FUSION.2005.252904>.
- [65] S. Şahin, Ş. Yalçın, H.M. Şahin, M. Übeyli, Neutronics analysis of HYLIFE-II blanket for fissile fuel breeding in an inertial fusion energy reactor, *Annals of Nuclear Energy*. 30 (2003) 669–683.
- [66] A. Acir, E. Baysal, Monte Carlo calculations of the incineration of plutonium and minor actinides of laser fusion inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine, *Plasma Sci. Technol.* 20 (2018) 075601. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aab3c4>.
- [67] R.W. Moir, 'HYLIFE-II Inertial Confinement Fusion Power Plant Design', *Part. Accel.* 37 (1992) 467–480.
- [68] D.-K. Sze, L.M. Waganer, M.S. Tillack, I.N. Sviatoslavsky, L.A. El-Guebaly, Blanket Selection for the Starlite Project, *Fusion Technology*. 30 (1996) 995–999. <https://doi.org/10.13182/FST96-A11963066>.
- [69] D.-K. Sze, M. Tillack, L. El-Guebaly, Blanket system selection for the ARIES-ST, *Fusion Engineering and Design*. 48 (2000) 371–378. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(00\)00146-0](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(00)00146-0).
- [70] R.A. Causey, Tritium Barriers and Tritium Diffusion in Fusion Reactors Rion A. Causey, Richard A. Karnesky, Chris San Marchi, (n.d.). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.156.7863&rep=rep1&type=pdf> (accessed March 9, 2016).
- [71] X. Chen, A. Bhattacharya, M.A. Sokolov, L.N. Clowers, Y. Yamamoto, T. Graening, K.D. Linton, Y. Katoh, M. Rieth, Mechanical properties and microstructure characterization of Eurofer97 steel variants in EUROfusion program, *Fusion Engineering and Design*. 146 (2019) 2227–2232. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.158>.
- [72] W. Kuan, M.A. Abdou, A new approach for assessing the required tritium breeding ratio and startup inventory in future fusion reactors, *Fusion Science and Technology*. 35 (1999) 309–353.
- [73] J. Shimwell, L. Morgan, S. Lilley, T. Eade, M. Kovari, S. Zheng, J. McMillan, Spatially and temporally varying tritium generation in solid-type breeder blankets, *Fusion Engineering and Design*. 98–99 (2015) 1868–1871. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.04.018>.

- [74] H. Kwast, E. Cordfunke, R. Muis, Fabrication, properties, and tritium release rates of lithium zirconates, *Ceram. Trans. Vol 27 Fabr. Prop. Lithium Ceram. III*, (1992).
- [75] J.G. van der Laan, H. Kwast, M. Stijkel, R. Conrad, R. May, S. Casadio, N. Roux, H. Werle, R.A. Verrall, EXOTIC-7: Irradiation of ceramic breeder materials to high lithium burnup, *Journal of Nuclear Materials*. 233–237 (1996) 1446–1451. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00132-8).
- [76] S. Saito, K. Tsuchiya, H. Kawamura, T. Terai, S. Tanaka, Density dependence on thermal properties of Li_2TiO_3 pellets, *Journal of Nuclear Materials*. 253 (1998) 213–218. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(97\)00314-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)00314-0).
- [77] K. Tsuchiya, M. Nakamichi, A. Kikukawa, Y. Nagao, M. Enoda, T. Osaki, K. Ioki, H. Kawamura, In-pile test of Li_2TiO_3 pebble bed with neutron pulse operation, *Journal of Nuclear Materials*. 307–311 (2002) 817–822. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)01304-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)01304-1).
- [78] A. Abou-Sena, A. Ying, M. Abdou, Effective Thermal Conductivity of Lithium Ceramic Pebble Beds for Fusion Blankets: A Review, *Fusion Science and Technology*. 47 (2005) 1094–1100. <https://doi.org/10.13182/FST05-3>.
- [79] M.M.W. Peeters, A.J. Magielsen, M.P. Stijkel, J.G. van der Laan, In-pile tritium release behaviour of lithiummetatitanate produced by extrusion–spheroidisation–sintering process in EXOTIC-9/1 in the high flux reactor, Petten, *Fusion Engineering and Design*. 82 (2007) 2318–2325. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.05.036>.
- [80] R. Knitter, B. Alm, G. Roth, Crystallisation and microstructure of lithium orthosilicate pebbles, *Journal of Nuclear Materials*. 367–370 (2007) 1387–1392. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.04.002>.
- [81] M. Aristova, C.A. Gentile, Comparative Study to Evaluate Candidate Materials for Tritium Production in a Direct Drive IFE Reactor, *Fusion Science and Technology*. 56 (2009) 475–477.
- [82] C.S. Becquart, C. Domain, Migration energy of He in W revisited by ab initio calculations, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.196402>.
- [83] R. Knitter, U. Fischer, S. Herber, C. Adelhelm, Reduction of impurities and activation of lithium orthosilicate breeder materials, *Journal of Nuclear Materials*. 386–388 (2009) 1071–1073. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.12.284>.
- [84] T.K. Basu, Neutron Multiplication Studies in Beryllium for Fusion Reactor Blankets, *Nuclear Science and Engineering*. 70 (1979) 309–313. <https://doi.org/10.13182/NSE79-A20153>.

- [85] F. Scaffidi-Argentina, Tritium and helium release from neutron irradiated beryllium pebbles from the EXOTIC-8 irradiation, *Fusion Engineering and Design*. 58–59 (2001) 641–645. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(01\)00510-5](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(01)00510-5).
- [86] K. Maki, Energy Multiplication in High Tritium Breeding Ratio Blanket with Front Breeder Zone for Fusion Reactors, *Journal of Nuclear Science and Technology*. 25 (1988) 72–80. <https://doi.org/10.1080/18811248.1988.9733557>.
- [87] A.V. Fedorov, S. van Til, M.P. Stijkel, M. Nakamichi, M. Zmitko, Post irradiation characterization of beryllium and beryllides after high temperature irradiation up to 3000 appm helium production in HIDOBE-01, *Fusion Engineering and Design*. 102 (2016) 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.10.024>.
- [88] R.F. Mattas, M.C. Billone, Materials for breeding blankets, *Journal of Nuclear Materials*. 233 (1996) 72–81.
- [89] J. Knaster, A. Moeslang, T. Muroga, Materials research for fusion, *Nature Physics*. (2016) 424–434. <https://doi.org/10.1038/nphys3735>.
- [90] C. Andrieu, S. Ravel, G. Ducros, C. Lemaignan, Release of fission tritium through Zircaloy-4 fuel cladding tubes, *Journal of Nuclear Materials*. 347 (2005) 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2005.06.008>.
- [91] C.A. Teodoro, COMPARISON OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION RESISTANCE OF ZIRLO AND OTHER ZIRCONIUM ALLOYS, (2007) 6.
- [92] A.G. Croff, A User's Manual for the ORIGEN2 computer code. ORNL/TM-7175, 1980.
- [93] H. Brockmann and U. Ohling, A General Purposes Activation Code, Jülich 1866, 1983.
- [94] J. Sanz, ACAB Activation Code for Fusion Applications: User's, Manual V5.0, Lawrence Livermore National Laboratory UCRLMA-143238, 2000.
- [95] O. Cabellos, J. Sanz, N. García-Herranz, S. Díaz, S. Reyes, S., Transmutation analysis of realistic low-activation steels for magnetic fusion reactors and IFMIF, *Journal of Nuclear Materials*. Vol. 367–370, Part 2 (2007) 1562–1567.
- [96] T.M. Anklam, M. Dunne, W.R. Meier, S. Powers, A.J. Simon, LIFE: The Case for Early Commercialization of Fusion Energy, *Fusion Science and Technology*. 60 (2011) 66–71. <https://doi.org/10.13182/FST10-329>.
- [97] J.-L. Miquel, C. Lion, P. Vivini, The Laser Mega-Joule : LMJ & PETAL status and Program Overview, *Journal of Physics*. (2013) 7.
- [98] H. Wang, M. Yang, Y. Gong, L. Feng, C. Dang, Y. Shi, Q. Shi, J. Wei, Z. Liao, T. Lu, Fabrication of nanostructured Li₂TiO₃ ceramic pebbles as tritium breeders using powder particles synthesised via a CTAB-assisted method, *Ceramics International*. 43 (2017) 5680–5686. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.01.106>.

- [99] T. Hoshino, Y. Edao, Y. Kawamura, K. Ochiai, Pebble fabrication and tritium release properties of an advanced tritium breeder, *Fusion Engineering and Design*. 109–111 (2016) 1114–1118. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.01.012>.
- [100] F.A. Hernández, P. Pereslavytsev, First principles review of options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors, *Fusion Engineering and Design*. 137 (2018) 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.09.014>.
- [101] D. Sathiyamoorthy, S.J. Ghanwat, B.M. Tripathi, C. Danani, Novel mixed-oxide ceramic for neutron multiplication and tritium generation, *Journal of Nuclear Materials*. 417 (2011) 775–779. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.12.138>.
- [102] B.N. Rath, S.J. Ghanwat, S. Kaity, C. Danani, R.V. Kulkarni, V.D. Alur, D. Sathiyamoorthy, S. Anantharaman, Thermal Conductivity of Composites of Beryllia and Lithium Titanate, *Journal of Materials Engineering and Performance*. 22 (2013) 3455–3460. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0606-z>.
- [103] T.Gorley, et al, “Initial MCNP6 Release Overview”, *Nuclear Technology*, 180, pp289-315(Dec-2012), n.d.
- [104] J.Sanz, et al, NEA-1839/02 ACAB-2008, n.d.
- [105] R. Sacks, G. Moses, V. Tang, K. Kramer, H. Scott, J. Demuth, Parameter Study of an Inertial Fusion Energy Chamber Response Using the 1-D BUCKY Radiation Hydrodynamics Code, *Fusion Science and Technology*. 66 (2014) 349–357. <https://doi.org/10.13182/FST14-789>.
- [106] L. El-Guebaly, V. Massaut, K. Tobita, L. Cadwallader, Goals, challenges, and successes of managing fusion activated materials, *Fusion Engineering and Design*. 83 (2008) 928–935. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.05.025>.
- [107] A. Fierro, F. Sordo, I.A. Carbajal-Ramos, J.M. Perlado, A. Rivera, Conceptual design of a ceramic breeding blanket for laser fusion power plants with online tunable tritium breeding ratio based on a variable neutron reflector: Remarkable no need of isotopic enrichment, *Fusion Engineering and Design*. 155 (2020) 111648. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111648>.
- [108] ARIES-IFE Target Spectra, (n.d.). <http://aries.ucsd.edu/ARIES/WDOCS/ARIES-IFE/SPECTRA/> (accessed May 15, 2016).
- [109] A.R. Raffray, M. Akiba, V. Chuyanov, L. Giancarli, S. Malang, Breeding blanket concepts for fusion and materials requirements, *Journal of Nuclear Materials*. 307 (2002) 21–30.
- [110] J. G. van der Laan, A. V. Federov, S. van Til, J. Reimman, Ceramic Breeder Materials, *Comprehensive Nuclear Materials*, 1st. Ed, Elsevier Science, R Konings, 2012.

- [111] T. Tanifuji, D. Yamaki, S. Jitsukawa, Tritium release from neutron-irradiated Li₂O: Transport in porous sintered pellets, *Fusion Engineering and Design*. 81 (2006) 595–600. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.10.011>.
- [112] H. Wang, M. Yang, R. Chen, Y. Gong, Y. Shi, H. Guo, Y. Zeng, Z. Liao, J. Qi, Q. Shi, T. Lu, Low-temperature preparation of nanostructured Li₂TiO₃ tritium breeder ceramic pebbles using CTAB-modified ultrafine powders by a mixed solvent-thermal method, *Journal of Nuclear Materials*. 519 (2019) 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.02.020>.
- [113] M. Kobayashi, Y. Oya, K. Okuno, Migration of hydrogen isotopes in lithium metatitanate, *Journal of Nuclear Materials*. 439 (2013) 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.04.020>.
- [114] J.F. Latkowski, others, Chamber design for the laser inertial fusion energy (LIFE) engine, *Fusion Science and Technology*. 60 (2011) 54–60.
- [115] K. Shin-mura, Y. Otani, S. Ogawa, T. Hoshino, K. Sasaki, Li vaporization properties of candidate materials for tritium breeder with high Li density, *Fusion Engineering and Design*. 124 (2017) 762–766. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.04.053>.
- [116] K. Shin-mura, S. Honda, T. Hoshino, K. Sasaki, Li vaporization property of Li₈ZrO₆ and Li₅AlO₄ as tritium breeders, *Fusion Engineering and Design*. 136 (2018) 869–873. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.025>.
- [117] M. Hong, Y. Zhang, M. Xiang, Z. Liu, Preparation and characterization of Li₄SiO₄ ceramic pebbles by graphite bed method, *Fusion Engineering and Design*. 95 (2015) 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.04.039>.
- [118] A. Aiello, G. Benamati, R. Melder, A. Povstyanko, Mechanical properties of Eurofer 97 in Pb–16Li and irradiation effect, *Journal of Nuclear Materials*. 376 (2008) 396–400. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.02.041>.
- [119] G. Farkas, V. Sluge, P. Domonkoš, Nuclear Analysis of the Eurofer 97 Alloy by MCNP-4C2 code, (n.d.) 7.
- [120] F.A. Hernández, P. Pereslavitsev, G. Zhou, Q. Kang, S. D’Amico, H. Neuberger, L.V. Boccaccini, B. Kiss, G. Nádas, L. Maqueda, I. Cristescu, I. Moscato, I. Ricapito, F. Cismondi, Consolidated Design of the HCPB Breeding Blanket for the Pre-Conceptual Design Phase of the EU DEMO and Harmonization with the ITER HCPB TBM Program, . . Performance. (n.d.) 20.
- [121] H. Hadraba, I. Dlouhy, Effect of thermal ageing on the impact fracture behaviour of Eurofer’97 steel, *Journal of Nuclear Materials*. 386–388 (2009) 564–568. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.12.319>.
- [122] T. Jailin, N. Tardif, J. Desquines, P. Chaudet, M. Coret, M.-C. Baietto, V. Georgenthum, Thermo-mechanical behavior of Zircaloy-4 claddings under

- simulated post-DNB conditions, *Journal of Nuclear Materials*. 531 (2020) 151984. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.151984>.
- [123] R.M. Jr, C. Gesh, R. Pagh, R. Rucker, R.W. Iii, *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling*, (n.d.) 375.
- [124] F. Tavassoli, Eurofer Steel, Development to Full Code Qualification, *Procedia Engineering*. 55 (2013) 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.258>.
- [125] H.-J. Shi', THERMOMECHANICAL FATIGUE OF A 316L AUSTENITIC STEEL AT TWO DIFFERENT TEMPERATURE INTERVALS, (n.d.) 1.
- [126] P.A. Turner, N. Christodoulou, C.N. Tomé, Modeling the mechanical response of rolled Zircaloy-2, *International Journal of Plasticity*. 11 (1995) 251–265. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(94\)00048-4](https://doi.org/10.1016/0749-6419(94)00048-4).