

DISEÑO CONCEPTUAL E INGENIERIA DE DETALLE DE UN LAZO EXPERIMENTAL DUAL Pb15.7Li/ HE (PROYECTO BCN_LOOP®): UNA PROPUESTA DE PROYECTO DE I+D+I INDUSTRIAL PARA DESARROLLOS CLAVE EN TECNOLOGIA NUCLEAR DE FUSION

Lluís Batet¹, F. Reventòs¹, E. Mas de les Valls¹, I. Fernández², G. Veredas², J. Abellà³, J. Sempere³, M. Sanmartí⁴, J. I. Linares⁵, L. A. Sedano^{6,2}

¹ Tech. Univ. of Catalonia (UPC), Av. Diagonal 647, 08028, Barcelona. ² EURATOM-CIEMAT Fusion Assoc., Av. Complutense 22, 28040, Madrid. ³ URL, Chemical Institute of Sarrià, Via Augusta, 390 08017 Barcelona. ⁴ IREC, Plaça de les Monges de Negre, Sant Adrià del Besòs, Barcelona. ⁵ Universidad Pontificia Comillas, c/ Alberto Aguilera 23-250, 28015 Madrid. ⁶ Universidad de Oviedo. C/ Independencia 13, 33004 Oviedo

SINOPSIS

Los desarrollos en Tecnología Nuclear de Fusión requieren de nuevas infraestructuras científicas claramente orientadas desde un punto de vista programático. La demostración experimental de la capacidad final de extraer y convertir grandes cantidades de potencia nuclear depositada en un componente con un metal líquido (Pb15.7Li) circulando a alta velocidad bajo campo magnético intenso representa una demostración clave y de relevancia máxima en el desarrollo de la fusión nuclear como tecnología energética. Hemos configurado y propuesto para su lanzamiento un Proyecto de I+D+i industrial para el *diseño conceptual y la ingeniería de detalle de un doble bucle de Pb15.7Li /Helio presurizado*, anticipando una construcción a futuro. Su interés técnico viene justificado en programas de fusión ITER (ej.: Test Blanket Modules, TBMs) y DEMO (CONSOLIDER TECNO_FUS) [1] y en desarrollos clave hacia un aumento de retornos por capacitación y calificación desde la Agencia de Fusión "Fusion for Energy" (F4E). La arquitectura de la instalación propuesta para desarrollo consiste en dos lazos independientes, (pero interdependientes), uno de Pb15.7Li y el otro de Helio a presión, ligados a través de un intercambiador de calor de diseño de *ex-proffeso* (potencias ~ 0.5 -1 MWt, bajo campo magnético intenso: 1-3 T).

El diseño conceptual del doble bucle va dirigido a la operación experimental flexible debiendo permitir la simulación MHD de caudales máscicos y térmicas en condiciones próximas al funcionamiento de diseños de TBM a doble refrigerante (Dual-Coolant Lead-Lithium DCLL blankets). Una arquitectura modular para determinados subsistemas pretende dar flexibilidad para pruebas y validación de diseños diferentes soluciones de componentes y sistemas (ej.: un permeadores contra el vacío, configuraciones de conversión, bombas y recirculadores, etc). Ambos lazos primarios se conciben equipados de componentes clave e instrumentación crítica de monitorización y control; y acoplan aun secundario justificado de Interés para el desarrollo de la tecnología de sobre la referencia del CO₂ supercrítico como caloportador. Nuestra ponencia: (1) proporciona un fundamento para el diseño, la construcción y los necesarios desarrollos de I+D de la nueva instalación propuesta, (2) discute posibles configuraciones de lay-out para los objetivos de experimentación de la instalación justificando el interés y necesidad de la instalación para los estudios de modelización que exigen los desarrollos tecnológicos, (3) discrimina y explora los desarrollos de instrumentación clave a considerar, (4) anticipar las características de diseño del intercambiador doblemente enfriado bajo campo magnético y por último (5) ofrece un dimensionamiento aproximado global de todo el sistema.

1. BCN_LOOP®: fundamentos para diseño, construcción y desarrollo de la instalación

Los desarrollos en Tecnología de Fusión en España y la implicación relevante en programas emergentes a nivel internacional requiere de nuevas estructuras científicas.

El Proyecto BCN_LOOP® propone un ejercicio avanzado de concepción de un nuevo bucle experimental para desarrollos genuinos de la Tecnología de Fusión: un doble bucle, que llamamos BCN_LOOP®, desarrollos que van desde el diseño conceptual hasta su detalle de ingeniería.

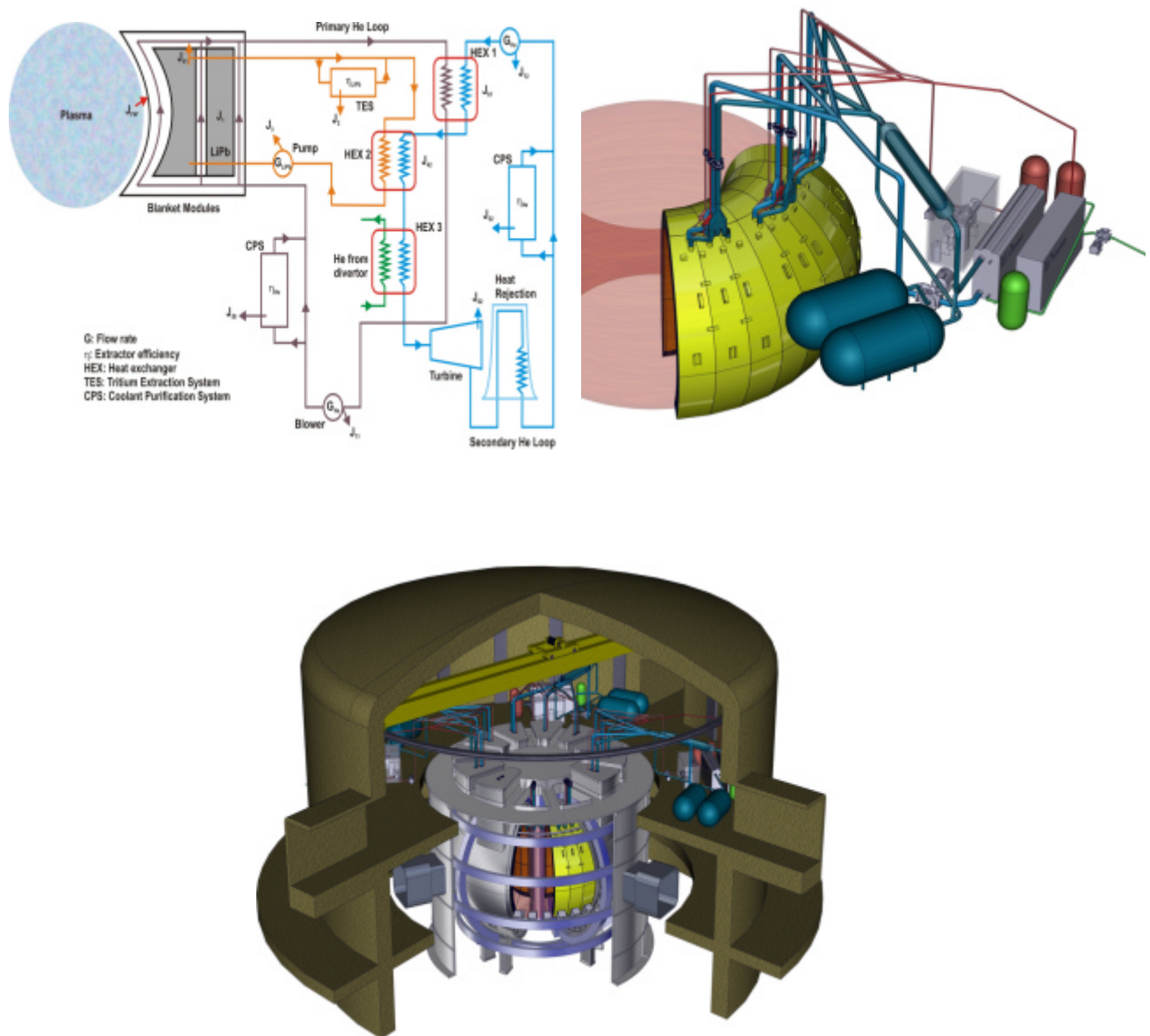


Figura 1. Reactor de demostración DEMO. Envoltura regeneradora a refrigerante dual-refrigerante y sistemas auxiliares asociados lay-out en desarrollo dentro de la TECNOLÓGICA de Programa de Español. (Arriba: Esbozo simplificado para sistemas auxiliares DEMO refrigerante dual y visión artística, abajo: a la derecha: vista artístico de una DEMO de español¹).

La propuesta como Proyecto arranca desde su propia justificación racional en el contexto de los programas internacionales en tecnología de fusión (y lo que denominamos relevancia "DEMO") y de los desarrollos tecnológicos genuinos identificados estableciendo especificaciones iniciales aproximadas por medio de análisis no-dimensionales.

BCN_LOOP® se lanza principalmente bajo la perspectiva de participación Española en los Programas Internacionales de Tecnología Nuclear de Fusión (ITER TBM, EFDA DEMO, Acuerdo EU-JP Broader Approach) que

¹ Los aspectos técnicos clave que justifican la superioridad tecnológica de los conceptos de envoltura a doble refrigerante para reactores de fusión DEMO y por ende el interés de su desarrollo en el Programa Nacional español fueron recogidos en ponencias del a SNE en años precedentes [1]

inevitablemente requieren de nuevas infraestructuras científicas claramente orientadas desde un punto de vista programático y desde el mapa de Infraestructuras científicas establecido en 2006 para el Proyecto B_FUS.

1.1. ¿ Cuáles son los objetivos de BCN_LOOP®?

La futura instalación debe proporcionar la demostración experimental de la capacidad final de alta potencia de refrigeración (1 MW_t) con metal líquido de un componente bajo intenso campo magnético. Dicha demostración resulta de interés y relevancia estratégica capital en los desarrollos historia Tecnología Nuclear y es de enorme valor estratégico para la Tecnología de Fusión.

La propuesta va desde el diseño conceptual hasta los aspectos fundamentales de su ingeniería de detalle: (1) *diseño y simulación de componentes y sistemas*, (2) *concepción y desarrollo de componentes*, (3) *desarrollo y calificación de procesos*, (4) *ingeniería para la instrumentación de monitorización y control y ensayos (diagnósticos)*, (5) *análisis óptimo de configuraciones para la conversión de potencia*.

La instalación se concibe como una instalación con dos sub-lazos principales primarios:

- uno con un metal líquido (eutéctico de litio y plomo: Pb15.7Li) como refrigerante primario y
- un sub-lazo complementario refrigerante con helio presurizado como fluido caloportador,

junto a:

- un intercambiador/extractor de calor entre ambos fluidos en referencia de rangos a 1 MW-térmico a

operar bajo campo magnético para ensayo de características MHD

junto con:

- un circuito secundario refrigerado con CO₂^{SC} supercrítico y terciarios de agua.

Se proponen actividades de diseño de ingeniería conceptual y "de detalle" y un conjunto completo de desarrollos tecnológicos clave a lo largo de tareas técnicas interrelacionadas y distribuidas en los diversos Proyectos Singulares relativas a:

- (1) diseño integral y modelado del lazo integral (B_LOOP®) de sus diversos sub-lazos (de Helio, de Metal Líquido/de CO₂ supercrítico), de los diversos sistemas de sub-loops y de sus componentes singulares (bombas, intercambiadores, recuperadores, permeadores, saturadores,...)
- (2) desarrollos genuinos de la ingeniería en instrumentación específica,
- (3) un gran número de tecnologías de procesamiento de los efluentes (control del título en Li y reequilibrado, - control de impurezas,) y de solutos de referencia (H₂ o D₂) (tecnologías de control y recuperación de tritio, saturadores ...) en ellos y
- (4) estudios de optimización de configuraciones para exploración y demostración en ulteriores ensayos.

La concepción de los programas experimentales a desarrollar en la instalación en función de lo que denominamos "relevancia DEMO" representan un importante input para la concepción global de la instalación BCN_LOOP®. El propósito del Bucle experimental BCN_LOOP como instalación consiste en:

- investigar componentes de referencia y comportamiento de sistemas y prestaciones últimas,
- investigar posibles configuraciones de bucle de referencia y optimizarlas,
- investigar y calificar las tecnologías de proceso de efluentes y solutos,
- investigar y calificar la instrumentación específica.

Otros objetivos de I+D adicionales están relacionados con el desarrollo de componentes y sistema de capacidades de modelado y su futuro contraste experimental.

El objetivo final de las actividades de concepción de BCN_LOOP® no es otro que el de su construcción para su explotación en el plazo que las condiciones de entorno económico del país lo permita.

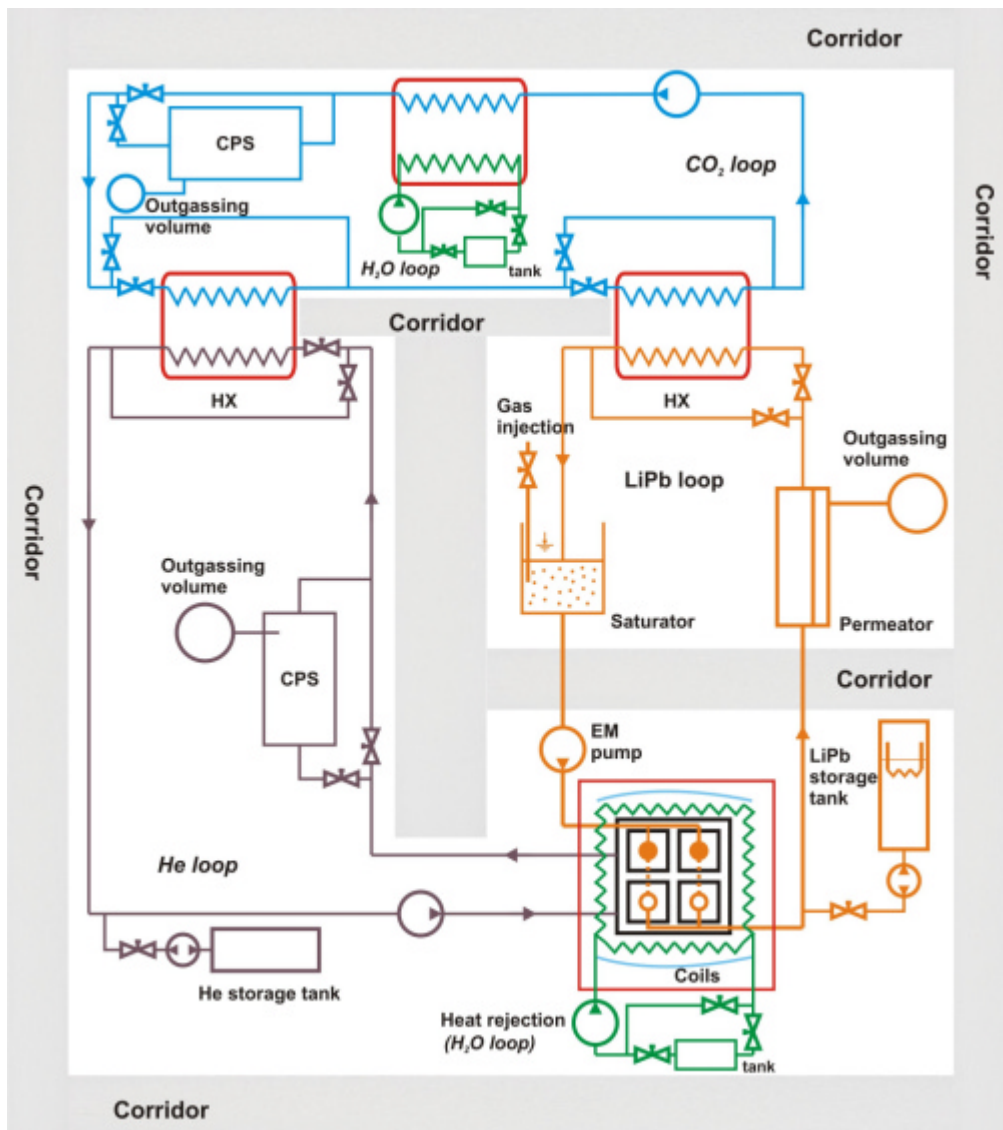


Figura 2. Configuración de partida para la definición del Proyecto BCN_LOOP® como diagrama de proceso.

1.2. ¿Por qué se propone este bucle experimental y no otro?

Esta cuestión fue abordada previamente en un estudio específico de Industria de la Ciencia/CDTI (IDOM) en colaboración con CIEMAT en el que se analizaron lazos experimentales existentes en distintos programas internacionales en Tecnología Nuclear de Fusión [2].

La respuesta debe encontrarse en las opciones de programa nacional español de desarrollos en Tecnología de Fusión que apuesta por las soluciones a doble refrigerante He/Metal Líquido. Las envolturas a Doble Refrigerante LM/He para reactores de fusión han venido representando la opción de referencia en el Programa Nacional de Fusión en España y están siendo desarrolladas bajo el programa de CONSOLIDER TECNO_FUS 2009-2013. Como un valor estratégico añadido, la opción de diseño "dual" va a probarse en un entorno de fusión nuclear (ITER) como Módulo de Ensayo como opción desarrolladas en USA y China. España participa hoy en importantes acciones tecnológicas en el Programa UE ITER TBM (400M€) obteniendo importantes retornos de la participación CIEMAT en el Consorcio la UE ITER-TBM que pretender intensificar y extender en el tiempo.

Más allá de aplicaciones específicas de la instalación de fusión podría afectar un conjunto muy amplio de las tecnologías subyacentes para Tecnología Nuclear de Fusión.

La existencia futura de esta instalación es del interés de otros programas tecnológicos en el área de la energía (GEN IV, IFMIF,) y surge en el contexto del necesario desarrollo de nuevas infraestructuras científicas dentro del programa de tecnología de fusión español (B_FUS/IREC).

Tabla I. Bucles dentro del Programa Europeo de Fusión [3].

Bucles de Helio presurizado			
Instalación	Situada en	Características	Estado/ Disponibilidad Objetivo
HeFus3	ENEA, Italia en Brasimone	Lazo He, 530°C, 105 bar, < 0.4 kg/s	Operativo, TH y ensayos de fatiga ciclica para componentes
HeFus3 (upgrade)	ENEA, Italia en Brasimone	Lazo He, 530°C, 105 bar, < 1.4 kg/s	Operativo, TH y ensayos de fatiga ciclica para componentes
HEBLO	FzK, Alemania en Karlsruhe	Lazo He, 530°C, 100 bar, <0.3kg/s	Operativo, (actualizado 2009)
HELOKA	FzK en Karlsruhe	Lazo He, 530°C, 100 bar, < 0.4kg/s	Operativo, (actualizado 2009)
HELITE	CEA en Cadarache	900 °C, 25-80 bar, < 0.4 kg/s	Operativo, Leak control impurities, TH also for VHTR
Bucles de Metal Liquido (Eutectico de LiPb)			
Instalación	Situada en	Características	Estado/ Disponibilidad Objetivo
TRIEX	ENEA, Brasimone	LiFus2 con saturador de H2 300-500 °C, 10 bar, < 0.3 kg/s, 105 Litros de LiPb	Operativo, Control de H2 + extractores, permeadores como tecnologías de proceso.
Piccolo	FzK, Karlsruhe	480-550°C y velocidades 1-30 cm/s	Ensayos de compatibilidad a diferentes temperaturas de Pb-Li; condiciones (HCLL TBM)
LIFUS2	ENEA, Brasimone	480-550°C y velocidades 1-30 cm/s	Ensayos de compatibilidad a diferentes temperaturas de Pb-Li; condiciones (HCLL TBM)
LRV-5	NRI, Check Rep	Pb-Li convección natural (2-5mm/s valor calculado) Temperatura 500±10°C;	Lazo bajo irradiación up to 1.3-1.4 dpa.
Instalación	Situada en	Características	Estado/ Disponibilidad Objetivo
Lazos dobles He/LiPb			
EBBTF	ENEA, Brasimone	Lazo doble ; LiFus2+HeFus3(u) 300-550 °C, 100 bar, < 0.4 kg/s	En construcción (esperado para 2013); a escala 1:1 HCLL TBM
DIADEMO	CEA, Cadarache	Doble LiPb (static)+ He como Refrigerante; 500 °C, 80 bar, < 0.05 kg/s	Operativo, ensayos TH y fatiga térmica ciclica

1.3. ¿Cuál es el contexto nacional de la propuesta dentro del marco de R&D español?

Por resolución de Julio de 2011, el MICINN otorgó una ayuda a la propuesta en 2011: " DISEÑO CONCEPTUAL Y DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DE UN PB15.7LI DE BUCLE DOBLE / PRESURIZADO PARA TECNOLOGÍA DE FUSIÓN NUCLEAR", (ref. 27331 ENE2011), propuesta liderada por la UPC (Prof. Francesc Reventós) y con b_FUS/IREC, IQS y CIEMAT como Proyecto Puente con objeto de generar una definición profunda y exhaustiva extensión del alcance de las áreas técnicas del proyecto y detalles de aspectos presupuestarios. Bajo este marco, UPC, b_FUS/IREC, IQS/URLI, COMILLAS y CIEMAT acordaron de manera conjunta la preparación de la presente propuesta para la presente convocatoria.

En la evaluación recibida se adelantó una evaluación general de costes de ingeniería con la perspectiva de su futura construcción a través de muchos instrumentos financieros potenciales disponibles como: i) el instrumento

de la CPI ("Compra Pública Innovadora" del MEyC/CDTI), ii) un "Proyecto Nuclí" de ACC10/GenCat para b_FUS-IREC y universidades, o iii) el potencial interés privado de empresas a través de CDTI o ACC10.

Una instalación experimental tipo Doble-Lazo B_LOOP®, forma parte del conjunto de infraestructuras otrora identificadas para el Proyecto B_FUS/IREC.

1.4. ¿Cuáles son las principales áreas de proyecto B_LOOP® y cómo se organiza la I+D propuesta ?

Se prevé desarrollar conocimiento subyacente y desarrollos tecnológicos en el Proyecto B_LOOP® a través de tres 3 proyectos singulares:

- **Proyecto Singular (# 1):** B_LOOP®: Diseño y simulación de sistemas y componentes (UPC)
- **Proyecto Singular (#2):** B_LOOP®: Desarrollos de instrumentación (IQS).
- **Proyecto Singular (#3):** B_LOOP® : Tecnologías de proceso y optimización de configuraciones (COMILLAS) .

La participación de diversos grupos de CIEMAT se prevé transversal a través de estas 4 tareas de I+D. Se propone un completo Plan de Gestión y Ejecución del Proyecto para Proyecto BCN_LOOP® pilotado desde b_FUS/IREC que incluye una evaluación de costes de la instalación.

1.5. Panorama de instalaciones experimentales en la UE y en todo el mundo de bucle para tecnología de fusión. Singularidad de la propuesta BCN_LOOP®

El panorama de bucles experimentales disponibles en He presurizados y Metales Líquidos (Li, LiPb) para Tecnología de Nuclear de Fusión fue analizado previamente en el marco de un contrato CDTI Industria de la Ciencia (IDOM y CIEMAT) [2].

El Programa de Fusión Europeo ha venido construyendo y desarrollando durante las tres últimas décadas diversos lazos experimentales principalmente en Italia, Alemania y Francia para tecnologías de envoltura regeneradora en los programas de desarrollo de la tecnología de fusión en el camino hacia el reactor de fusión DEMO. La más importante instalación en la UE es el lazo integrado italiano EBBTF (*European Breeding Blanket Test Facility*).

Las especificaciones de los bucles existentes hoy por hoy en la UE se orientan a rangos de conceptos de envoltura HCPB (*Helium-Cooled Pebble-Bed*) y HCLL (*Helium-Cooled Lead-Lithium*) y sus correspondientes programas ITER TBM (véase compendio en Tabla I), estando lejos de condiciones operativas de las envolturas duales: mucho más exigentes desde el punto de vista de caudales máxicos de ML y de requerimientos de ensayos para el intercambiador intermedio.

Las instalaciones fueron concebidas para aspectos de I+D singulares y específico en general con escasa flexibilidad experimental y adaptabilidad a rangos operativos y calificación de soluciones.

Una concepción flexible (en arquitectura modular y rangos operativos) haría de BCN_LOOP® una instalación experimentalmente envolvente de las ya existentes con incidencia en los Programas UE/TBM en curso. En la actualidad no existen bucles experimentales en la UE en rangos de doble-refrigerante en términos de rangos de extracción de potencia intercambiador de calor con caudales de LM y los existentes no puede proporcionar una demostración tecnológica clave de alta potencia de refrigeración (rangos de MWt) según lo previsto en BCN_LOOP® para el intercambiador intermedio.

Además las instalaciones existentes presentan sólo capacidades parciales de ensayo de tecnologías subyacentes (procesos, instrumentación, componentes,..).

La experiencia histórica en el CIEMAT en bucles de ML viene desde los años 70 con el desarrollo de lazos de Sodio para los programas de fisión de reproductores rápido ([4] Espigares et al.; Véase el informe anual del CIEMAT 1979) y más recientemente con la instalación LINCE (eutéctico PbBi) (para estudios de corrosión e instrumentación de aceros; [5]; existiendo experiencia adicional reciente derivada de la implicación en Programas EFDA.

Fuera de la UE, el programa americano dispone un pequeño bucle de NaK (similar a PbLi) (MTOR en UCLA) para estudios de MHD cerca la MEKKA alemán. El programa japonés tiene unos pequeños bucles de convección forzada para la evolución de la instrumentación en la Universidad de Kyoto como una instalación técnicamente modesta pero fructífera.

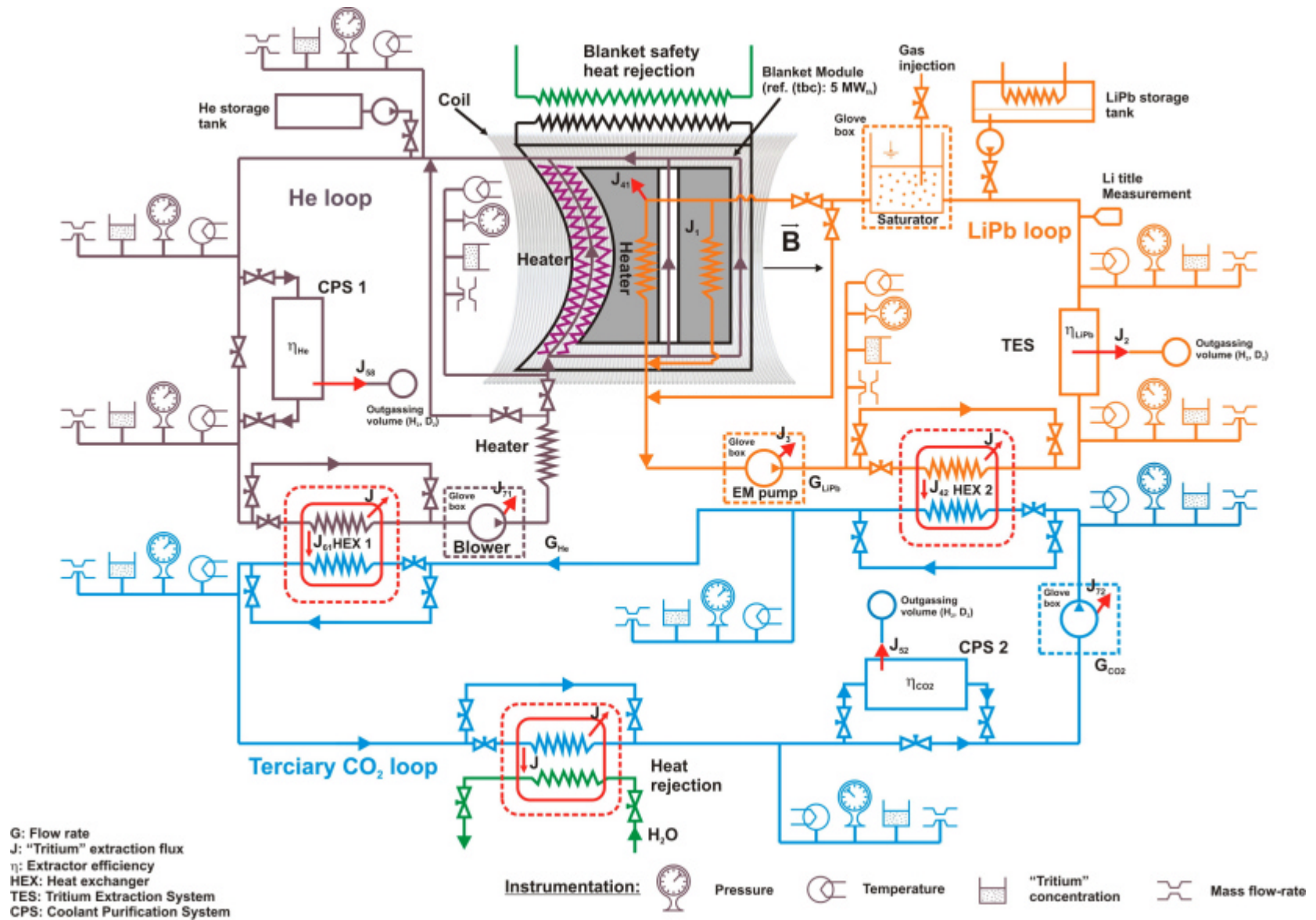


Figura 3. Referencia de Diagrama de Proceso para Instalación Experimental BCN_LOOP®.

La propuesta de instalación más próxima a BCN_LOOP® es la intención expresa del programa chino de fusión de construido lazo DRAGON V [[6]. Desde el Programa español se hace un seguimiento en corto de los desarrollos de DRAGON V en el Programa Chino.

2. BCN_LOOP®: opciones de concepción

La propuesta inicial para desarrollo consiste en dos lazos independientes pero interdependientes, un lazo primario de Pb15.7Li y otro de Helio a presión conectados a través de un intercambiador diseñado *ex-proffeso* en rangos de 0.5-1 MW_t operando bajo campo magnético intenso. Ambos primarios se acoplan a un tercer lazo adicional de ^{sc}CO₂ (Figura 3). Se opta por la opción conceptual de ^{sc}CO₂ por razones relacionadas con la gestión de tritio de compacidad de sistema ("simple" destritiación) y posibles innovaciones radicales previstas así como por razones de eficiencia. En ambos sub-lazos se insertan conceptualmente sistemas clave, componentes y necesaria instrumentación típica para sistemas auxiliares de doble-refrigerante.

BCN_LOOP® pretende ser concebida de forma modular a través de conectores de tubería doble pared especialmente concebido. Permitirá una gran flexibilidad futura prueba de sistemas y componentes. Un diseño modular flexible puede (debe) permiten para simular altos caudales máxicos y condiciones de funcionamiento amplia de otro DCLL a los diseños de la demostración. Este diseño de circuito flexible puede lograrse mediante el uso de conectores de tubería rápida especialmente diseñados y concebidos y bajo desarrollo en el CIEMAT. Este aspecto se afronta en la propia concepción al anticipar el programas experimentales de BCN_LOOP®.

3. Desarrollos de instrumentación de monitorización y control y diagnósticos en BCN_LOOP® [7]

Un segmento de envoltura regeneradora de un reactor DEMO futuro (o en su correspondiente modulo de calificación y ensayo en ITER), deberá operar altamente instrumentado por razones de seguridad y control. A día de hoy la búsqueda, consolidación e integración de señales en sistemas CODAC de soluciones al uso representa un problema mayor del a Ingeniería Nuclear para Fusión. A modo de ejemplo un TBM ITER prevé hoy extraer más de 1000 señales (en un componente de 2 x 1 x 0.8 m³).

BCN_LOOP® pretende ofrecer un marco de experimentación y calificación para un amplio conjunto de soluciones de instrumentación tanto para monitorización y control como para medidas (diagnósticos) a ser consideradas y probadas en BCN_LOOP®.

Un estudio específico previo en IQS ha revisado a fondo el con junto de instrumentación a desarrollar para ambientes de radiación y con necesidad de ensayo previo fuera de reactor [7]. Su desarrollo y validación representa un ambiciosísimo programa tecnológico específico de alto impacto en retornos de ITER (F4E). A destacar:

- ⇒ Diagnósticos de campo EM con resolución espacio/temporal resuelven B y J como medidores miniaturizados tipo bobinas Ruggowski, sensores de *Efecto Hall* miniaturizadas.
- ⇒ Sensores termomecánicos miniaturizables (de desplazamiento o torsión tipo galgas extensiométricas); fibra óptica;
- ⇒ Sensores FluidoDinámicos como cabezas de presión diferencial para medidas de caídas de presión en el metal líquido o medida rápida de fluctuación de presión nominal en helio presurizado
- ⇒ Sensores de concentración en litio-plomo y helio presurizado;
- ⇒ Sensores de corrosion para ensayos de corrosion de aceros y components en eutéctico de LiPb.

4. Desarrollos en tecnologías de proceso y optimización de configuraciones para sistemas de envoltura dual en BCN_LOOP®

Sobre la base del a referencia inicial cualitativa para BCN_LOOP® (Figura 3) existe todo un conjunto de configuraciones posible a experimentar y optimizar que tienen que ver con la eficiencia en conversión de potencia (diseño de primarios y arquitectura de secundarios) y el control óptimo de tritio en una configuración dada (la instalación experimenta con H2 y D2). A destacar: (1) tanques de almacenamiento y volúmenes de expansión genuinos para efluentes tritiados; (2) sistema eficientes de extracción/recuperación de hidrógeno/deuterio (para tritio) desde un ML, (3) sistemas de saturación de gas y un sistema de purga, (4) sistemas de control químico en línea del ML (oxidación y potencial de H), (5) sistemas de "trampa fría" para el control de impurezas (productos de corrosión) en el ML, (6) sistemas electroquímicos de medida y control para reajuste de título de eutéctico Li. Se consideran un amplio conjunto de soluciones de ingeniería para componentes radicalmente nuevos, como: (1) uso de conectores rápidos para pared tubo doble/simple, (2) saturadores eficientes de H2 en LM, (3) conceptos de la trampa fría para impurezas en LM y helio a presión, (4) diagnóstico en general y en particular, (5) sensores de control de presión parcial de H procesamiento de tecnologías para el control de tritio y recuperación en efluentes de diversos lazo, (6) recuperadores de tritio desde ML, (7) intercambiadores de calor de LM/CO₂ etc. (largo etc). La Universidad de Comillas ha venido explorando configuraciones óptimas para la conversión de potencias de primario duales a CO₂ supercrítico y configuraciones óptimas de secundario para conversiones de alta eficiencia nominal [8] y CIEMAT/COMILLAS ha desarrollado en el contexto del Programa TECNO_FUS desarrollos de diseño para intercambiadores óptimos desde ML/primario a CO₂ Secundario; para ensayo y experimentación a futuro [9]. La característica modular de la concepción de BCN_LOOP® debe permitir dicha experimentación. SENER Ing. y Sstemas junto a CIEMAT en el marco de un Proyecto CDTI/Industria de la Ciencia desde 2009 ha venido desarrollando un sistema de extractor de tritio (Permeador contra Vacío; FUSKITE® [10]), componente crítico para el manejo de tritio en los sistemas envolturas; desarrollo con impacto potencial en la tecnología TBM/HCLL de ITER. Una instalación como BCN_LOOP® representa la instalación idónea para la calificación de este tipo de tecnologías de proceso relevantes hacia DEMO.

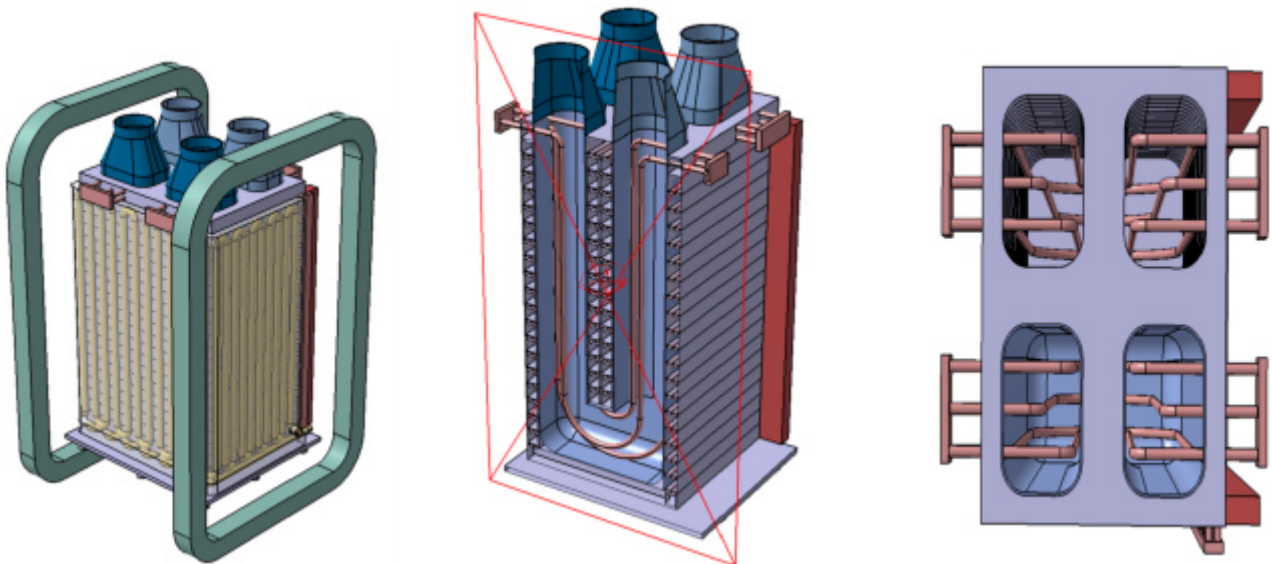


Figura 4. Referencia de diseño iniciales para intercambiadores duales ML/He bajo campo intenso.

5. Diseño y calificación experimental de un intercambiador dual como componte crítico: Características básicas, dimensionamiento y parámetros globales de la instalación BCN_LOOP®

El intercambiador intermedio a dos primarios (Helio. Li-Pb) representa el componente crítico a calificar y a ensayar en la instalación. Formal y experimentalmente se corresponde con un módulo de ensayo " fuera de reactor" de una envoltura regeneradora dual (DCLL) o bien de un equivalente experimental de un TBM DCLL ITER. Sus características de diseños e deben establecer bajo esa perspectiva de relevancia experimental de

ensayo reproduciendo números adimensionales críticos de un TBM DCLL (ITER). En lo fundamental, el componente intercambiador se diseña para fabricación en un acero ferrítico de baja activación (EUROFER, ASTURFER), incluye dos estructuras de canales refrigeradores para cada caloportador y un sistema de inyección de calentadores de potencia (algunos en el propio ML) junto a un sistema de rechazo térmico en la estructura. Un aspecto clave, singular y avanzado de ensayo radica en la operación experimental del componente bajo campo magnético intenso (1- 3 Tesla) con oblicuidad u ortogonalidad al caudal másico de metal líquido para ensayo directo de extracción e intercambio MHD, lo que impone la consideración de diseño de estructuras de canal aislante térmico/eléctrico (en SiC u otros). La Figura 4 muestra unas vistas cualitativas de diseño de partida para evolución.

Tabla II. Targets iniciales de diseño para intercambiador dual en BCN_LOOP® y dimensionamiento de los sistemas primarios.

BCN_LOOP® como Lazo doble He/LiPb		
	<ul style="list-style-type: none"> - ML; v 10 cm/s - Cargas mecánicas MHD en canales > 100 MPa - ML temperatures > 300-700 C - Temperaturas máxima en acero ferrítico 525 ° C - Re MHD simulation > 400 - Hartmann Ha > 20 000, Número de Interacción N > 106 (a confirmar) - Conductancia eléctrica de canal de ML ~ 0.1 	Helio < 100 bar, < 1 kg/s Nu > 400 ; Re > 10 ⁵

Las exigencia en las características de diseño del intercambiador interno se traslada en exigencias enormes para los sistemas de bombas EM y compresores/recirculadores de Helio; en el límite de la disponibilidad industrial actual.

6. Conclusiones

La ponencia presenta las características básicas de la propuesta de Proyecto Industrial para la Instalación Experimental BCN_LOOP®. Propuesta para desarrollo del diseño concpetual del a instalación, de aspectos clave de su ingeniería de detalle y tecnologías subyacentes relevantes. Los desarrollos en Tecnología de Fusión en España y la implicación relevante en programas emergentes a nivel internacional requiere de nuevas estructuras científicas.

ACRÓNIMOS

ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
TBM	Test Blanket Modules,
DCLL	Dual-Coolant Lead-Lithium blankets
MICINN	Ministerio de Ciencia e Innovación (hoy MINECO)
CPS	Coolant Purification System
EM	ElectroMagnético
EFDA	European Fusion Development Agreement
CPI	Compra Pública Innovadora
ML	Metal Líquido (referido a eutéctico de LiPb)
HCLL	Helium Coolant Lead-Lithium
HCPB	Helium Coolant Pebble Bed
EBTTF	European Breeding Blanket Test Facility

REFERENCIAS

- [1] Ponencia TECNOFUS 2011
- [2] *Viabilidad de un laboratorio de Metal Líquido para el desarrollo de tecnología prioritaria para ITER, IFMIF, DEMOPNE2007-133 IDOM/CDTI*].
- [3] EFDA Facilities Map Review 2010.
- [4] Espigares et al.; Véase el informe anual del CIEMAT 1979.
- [5] LINCE en XVII Conferencia Internacional sobre Ingeniería Nuclear (ICONE17) Julio 16, 2009, Bruselas, ISBN: 978-0-7918-4351-2.
- [6] Yican Wu*, and FDS Team, *Design and Construction of Lithium-Lead Experimental Loops in China*. 14th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-14), Sept. 6-11, 2009, Sapporo, Japan].
- [7] *Ultimate available diagnostic solutions for TBM systems, identification of R&D ongoing developments and selection of R&D lines for each type of instrumentation development*. Technical analysis and proposal of an R&D Programme on Diagnostics (Key control, monitoring and testing Instrumentation) ITER and DEMO internal reactor components. IQS Contract Study. J. Abellà et al.; Nov. 2011.
- [8] J.I. Linares, L.E. Herranz, B.Y. Moratilla, I.P. Serrano, POWER CONVERSION SYSTEMS BASED ON BRAYTON CYCLES FOR FUSION REACTORS, *Fusion Engineering and Design*, 86, 2735-2738, 2011.
- [9] I. Fernández, G. Veredas, I. Serrano, A. Cantizano, J.I. Linares, Y.B. Moratilla, J. Fradera, L. Batet, L. Sedano, NUMERICAL DESIGN ANALYSES OF A LEAD-LITHIUM/SUPERCRITICAL CO₂ PRINTED CIRCUIT HEAT EXCHANGER AT DEMO POWER CONVERSION RANGES, *Proceedings of International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-10)*, Portland (USA), September 11-16, 2011
- [10] Ver ponencia en Sesión Técnica Fusión I en esta RA.