

MYRRHA – Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications

P. Romojaro, L. Fiorito, A. Stankovskiy, G. Van den Eynde, R. Fernandez, G. Kennedy, D. De Bruyn, J. Engelen, D. Vandeplassche, H. Ait Abderrahim

SCK CEN, Boeretang 200, 2400 MOL, Bélgica

CONTEXTO

El aumento estimado de la población mundial a más de 9700 millones de personas para el año 2050, junto con la necesidad de un desarrollo sostenible para reducir las emisiones de CO₂ y combatir el cambio climático, la principal preocupación medioambiental en los próximos 50 años, hacen de la energía nuclear una parte de la solución para satisfacer las necesidades energéticas futuras. El término sostenible, en el contexto energético, implica la capacidad de producir energía durante mucho tiempo sin perjudicar a generaciones futuras, de modo que se respete el medio ambiente y la producción sea segura, viable económicamente y esté garantizada independientemente de la ubicación o los conflictos geopolíticos.

La energía nuclear es una fuente de energía competitiva, fiable y libre de emisiones que cumple todos los criterios mencionados anteriormente, pero que también tiene inconvenientes, como son la gestión de los residuos radiactivos de alta actividad, la potencial producción de materiales de calidad armamentística y el riesgo de accidente. La investigación y desarrollo de la energía nuclear tienen como objetivo

hacer frente a estos desafíos tecnológicos.

A este respecto, el desarrollo de un nuevo tipo de instalación nuclear que haga frente a las limitaciones de carácter tecnológico y socioeconómico mencionadas anteriormente, puede ser de gran importancia para la futura producción de energía sostenible. Los sistemas asistidos por acelerador (ADS) son reactores subcríticos acoplados a aceleradores, que requieren un suministro externo de neutrones para mantener la reacción de fisión en cadena, es decir, para mantener constante la potencia del reactor. Los neutrones son producidos por la interacción de un haz de protones de alta energía con núcleos atómicos pesados, como el eutéctico de plomo-bismuto, a través de lo que se conoce en la física nuclear como la reacción de espalación. El ADS puede quemar elementos transuránicos y productos de fisión de larga duración, reduciendo el volumen y la radiotoxicidad de los residuos de alta actividad y haciendo que la gestión y almacenamiento eventual del combustible nuclear gastado sean más fiables y seguros, tengan un menor coste y sean más respetuosos con el medio ambiente. Además, la operación de los

ADS puede interrumpirse inmediatamente deteniendo el acelerador. Así mismo, el funcionamiento subcrítico de estos sistemas proporciona mayor flexibilidad en la naturaleza de los combustibles utilizables y los parámetros de operación del sistema compatibles con el funcionamiento seguro de la planta, en comparación con los reactores críticos. Los ADS poseen una alta estabilidad operativa y márgenes adicionales para la inserción de reactividad positiva.

Por lo tanto, los sistemas subcríticos asistidos por acelerador tienen el potencial de allanar el camino a una producción de energía nuclear más respetuosa con el medio ambiente, segura y aceptable.

MYRRHA

El reactor de investigación multipropósito para aplicaciones de alta tecnología, MYRRHA, es una instalación experimental flexible que se está diseñando en el Centro de Investigación Nuclear Belga (SCK CEN) en Mol, Bélgica.

MYRRHA reemplazará al BR2, un reactor de ensayo de materiales operado en el SCK CEN desde 1961. Como infraestructura de investigación altamente innovadora y multidisciplinaria, MYRRHA abordará la necesidad de:

- Estudiar la transmutación tecnológicamente eficiente de los radionucleidos más tóxicos y de larga duración en el combustible nuclear gastado, con el fin de reducir su radiotoxicidad en volumen (en un factor 100) y en tiempo (de cientos de miles de años a unos pocos siglos) en comparación con las opciones de gestión actuales.

- Asegurar la producción continua de radioisótopos para aplicaciones médicas, debido a una creciente demanda en todo el mundo, y producir radioisótopos más eficientes y de alta calidad. Bélgica es uno de los cinco productores y distribuidores mundiales de radioisótopos para la medicina y en 2020 se pudieron llevar a cabo más de 9 millones de diagnósticos y 20000 tratamientos en todo el mundo gracias a la producción en el BR2.
- Llevar a cabo investigaciones y pruebas de materiales para los reactores de fisión nuclear actuales y futuros, así como para la tecnología de fusión nuclear.
- Proporcionar un acelerador multifuncional para investigación básica y aplicada.

MYRRHA se originó a partir del proyecto *Accelerator Driven Operated New Irradiation System* (ADONIS), desarrollado entre 1994 y 1996, que tenía como único objetivo producir ^{99}Mo utilizando un ciclotrón acoplado con un manto subcrítico. Este fue el primer proyecto en el SCK CEN donde se estudió el acoplamiento entre un acelerador, un blanco de espalación y un núcleo subcrítico. En 1998 se decidió ampliar el propósito de ADONIS y convertirlo en un reactor de ensayo de materiales con el fin de llevar a cabo investigación en materiales y combustibles, estudiar la viabilidad de la transmutación de actínidos minoritarios y demostrar el principio de los ADS a una escala de potencia razonable. De esa manera, nació el proyecto MYRRHA.

En 2005, MYRRHA consistía en un acelerador de protones que suministraba protones de 350 MeV de energía

y 5 mA de corriente a un blanco de espalación sin ventana acoplado a un reactor rápido subcrítico de 50 MW_{th}. Desde entonces, el SCK CEN y Bélgica abrieron MYRRHA a los Estados Miembros de la Unión Europea, así como a los principales países productores de energía nuclear, para participar en el desarrollo, construcción y operación de MYRRHA. Este diseño del 2005 fue la base inicial del proyecto integrado FP6 EUROTRANS (2005 – 2010), que resultó en el diseño de *Experimental Demonstration of the Technical Feasibility of Transmutation in an Accelerator Driven System* (XT-ADS), donde un acelerador lineal entrega una corriente de haz de protones de 3.2 mA con una energía de 600 MeV al blanco de espalación, con un ligero aumento de la potencia del reactor a 57 MW_{th}.

El diseño XT-ADS fue tomado como referencia para el trabajo realizado en el proyecto FP7 CDT, en el que se introdujo la posibilidad de operar como

un reactor crítico en el nuevo diseño de MYRRHA *Fast Spectrum Transmutation Experimental Facility*. A principios del 2014, el SCK CEN consolidó una versión coherente del sistema primario de MYRRHA, MYRRHA "Versión 1.6", que fue entregado a una oficina de ingeniería externa como base para el desarrollo de la ingeniería de la planta. Este diseño responde a las dificultades encontradas en las versiones anteriores; sin embargo, el precio a pagar es un aumento espectacular en el tamaño y el peso de todos los componentes y, en consecuencia, el coste proyectado de la construcción (1.6 G€ del 2014). Esto llevó a la Junta Directiva del SCK CEN, a finales de 2014, a solicitar una revisión de la "Versión 1.6" al equipo de diseño de MYRRHA con el objetivo de reducir el coste total. Ya se han logrado algunos resultados intermedios en este campo y la "Versión 1.8" está actualmente en marcha. En la Figura 1 puede encontrarse un diseño conceptual de la instalación MYRRHA.

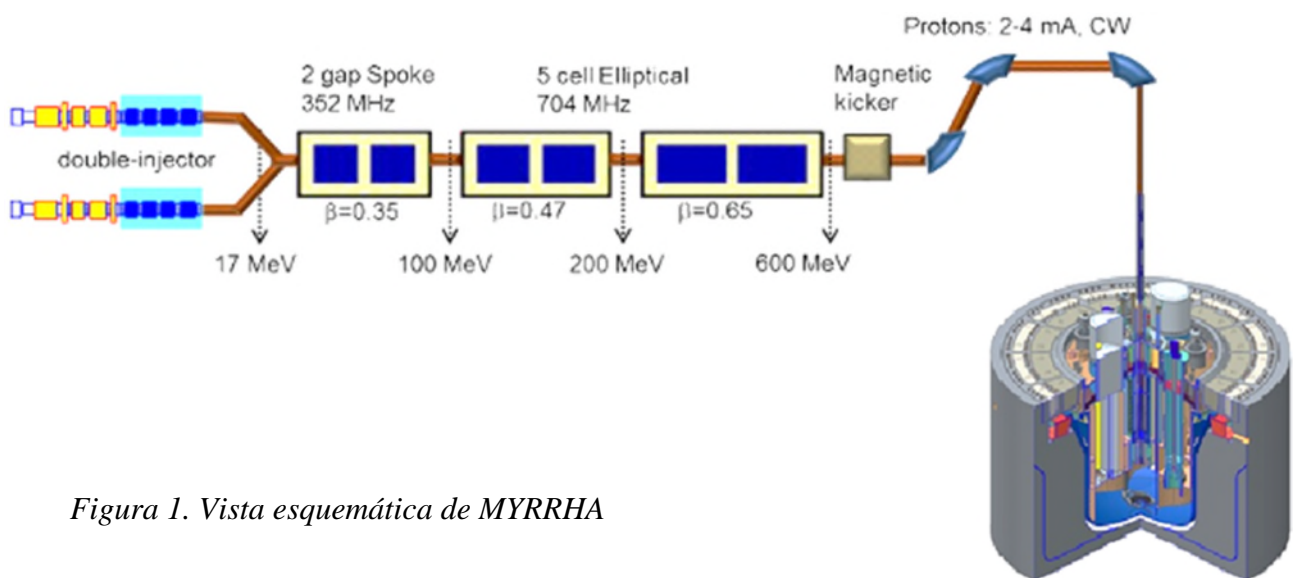


Figura 1. Vista esquemática de MYRRHA

REACTOR

MYRRHA ha sido concebido para operar en modo subcrítico o crítico, como un sistema asistido por acelerador o como un reactor rápido refrigerado por eutéctico de plomo-bismuto (LBE) respectivamente. En modo subcrítico, con $k_{eff} = 0.95$, el rango de potencia en operación es de 65 – 70 MWth en la versión más reciente (“Versión 1.8”) y alrededor de 100 MWth en la “Versión 1.6”, que es la que se describirá a continuación. El núcleo en modo subcrítico es asistido por un acelerador lineal de protones de alta potencia que entrega en modo continuo un haz de protones de 600 MeV de energía y hasta 4 mA de intensidad. En modo crítico, se elimina la línea del haz y se añaden varios elementos combustibles en la periferia del núcleo para alcanzar la criticidad, logrando una potencia nominal de 100 MWth.

MYRRHA es un ADS tipo piscina con todos los sistemas primarios relacionados con la seguridad alojados en la vasija del reactor. El pozo del reactor sirve como vasija de emergencia, mejorando las capacidades del sistema de refrigeración auxiliar del reactor. La tapa del reactor cierra la vasija y sirve como soporte para todos los componentes internos. Un diafragma dentro de la vasija separa el LBE frío y caliente, permite el almacenamiento de combustible dentro de la vasija (IVFS) y proporciona una separación de presiones. La estructura de soporte del núcleo, que lo mantiene en su lugar, consta de una coraza y una placa de soporte del núcleo. La Figura 2 muestra una sección del reactor MYRRHA con sus componentes internos principales.

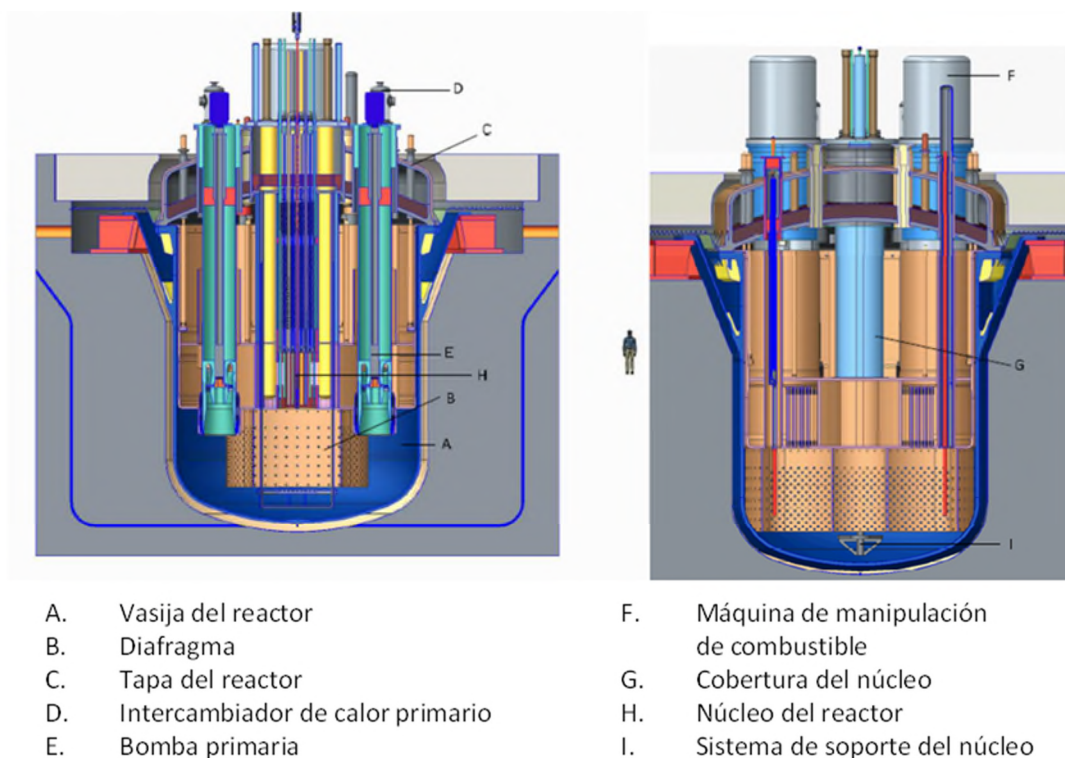


Figura 2. Vista general del reactor MYRRHA “Versión 1.6”

El núcleo subcrítico a inicio de vida consta de 54 elementos combustibles (FA), mientras que el crítico contiene 78. Con el fin de compensar las pérdidas de reactividad por quemado durante la operación (90 días de irradiación seguidos de 30 días de apagado), es necesario agregar algunos elementos combustibles adicionales.

Todo esto, unido a una estrategia "in-to-out" de redistribución del combustible utilizando lotes de 5 elementos combustibles (para preservar la simetría hexagonal), da como resultado 72 y 108 FAs en condiciones de cuasi-equilibrio para el núcleo subcrítico y el núcleo crítico respectivamente.

Los elementos combustibles hexagonales constan de 127 varillas que contienen combustible de óxido mixto MOX, con un enriquecimiento de 30% Pu + Am en metales pesados. Además de elementos combustibles, los núcleos contienen 4 elementos para

pruebas de materiales, elementos de irradiación para la producción de isótopos para medicina nuclear (4, el núcleo crítico y 6, el núcleo subcrítico), elementos que contienen barras de seguridad accionadas por gravedad, elementos con barras de control impulsadas por flotación, elementos llenos de LBE y elementos reflectores. El diseño del núcleo crítico y subcrítico se muestra en la Figura 3.

El diseño general incluye un circuito primario de LBE de tipo piscina, un circuito secundario con agua/vapor y un circuito terciario con aire. Los sistemas primario y secundario se han diseñado para evacuar una potencia máxima del núcleo de 110 MW_{th}. El exceso de 10 MW_{th} tiene en cuenta la energía depositada por los protones, el calor residual del combustible en el IVFS y la potencia depositada en el LBE por el calentamiento γ y la desintegración de elementos radiactivos como, por ejemplo, el polonio.

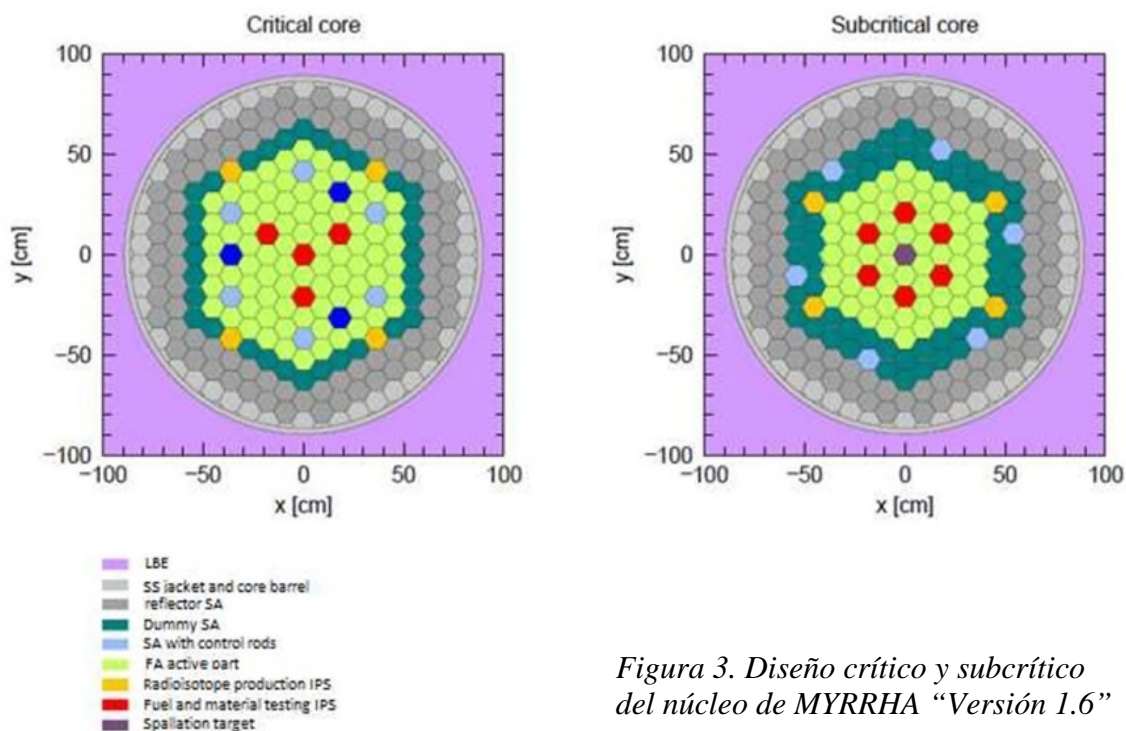


Figura 3. Diseño crítico y subcrítico del núcleo de MYRRHA "Versión 1.6"

Las bombas primarias bombearán LBE a través del núcleo con un caudal má-sico de 4750 kg/s (453 l/s por bomba) a una presión de trabajo de 300 kPa. Las bombas se fijarán en la parte superior de la tapa del reactor, que se supone es el único elemento de apoyo y guía del conjunto.

Los intercambiadores de calor primarios son intercambiadores de carcasa y tubos, de un solo paso y en contracorriente. Se utiliza agua a presión saturada a 200 °C como refrigerante secundario. Las paredes que separan el LBE y el agua (tubo de agua de alimentación y cúpula inferior) son de doble pared para evitar el precalentamiento del refrigerante secundario y evitar fugas de agua en el LBE en caso de fallo del tubo. En caso de pérdida de las bombas primarias, los intercambiadores de calor primarios no pueden extraer toda la potencia térmica. En tales casos, el acelerador se apaga en el modo subcrítico y las barras de control y seguridad se insertan en el modo crítico. La eliminación de calor de decaimiento se logra por convección natural y la eliminación final se realiza a través del sistema de refrigeración de la vasija del reactor por convección natural.

Desde el primer diseño de MYRRHA, la manipulación del combustible se realiza por debajo del núcleo a causa de la interferencia con el haz de protones, la ocupación de la habitación situada directamente encima del núcleo por una gran cantidad de instrumentación y penetraciones y la compactibilidad del núcleo; todo lo cual hace que el espacio resulte insuficiente para (des)cargar el núcleo desde arriba. Los elementos combustibles se mantienen flotando debajo de la placa de soporte del núcleo. Se utilizan dos máquinas

de manipulación de combustible situadas en lados opuestos, basadas en la conocida tecnología de reactor rápido del concepto de 'tapón rotatorio', utilizando robots SCARA. Cada máquina cubre un lado del núcleo. El uso de dos máquinas proporciona un alcance suficiente para cubrir las posiciones de almacenamiento de combustible necesarias, sin la necesidad de aumentar la vasija del reactor, que resultaría de utilizar una sola máquina de manipulación de combustible.

Los sistemas de acondicionamiento del LBE y gas de cobertura - manto de gas inerte encima del refrigerante, que se utiliza en reactores refrigerados por metales líquidos para evitar reacciones indeseadas del refrigerante con componentes del reactor - también son sistemas primarios porque están conectados directamente al reactor. Sin embargo, estos sistemas no están ubicados dentro de la vasija del reactor, sino dentro de la contención primaria porque no tienen una función de seguridad. Los sistemas deben controlar la calidad del refrigerante y del gas de cobertura de nitrógeno. La calidad del LBE es importante para evitar la corrosión y erosión de los materiales del reactor. Para facilitar el control de la composición química del LBE, la pureza del gas de cobertura también es importante porque los elementos no inertes pueden interactuar con los diferentes tipos de acero o el LBE. Adicionalmente, ambos sistemas están diseñados para filtrar algunos elementos radiactivos de los fluidos con el fin de mantener los niveles de radiactividad lo más bajos posible.

ACELERADOR

El inyector MYRRHA es un acelerador lineal (linac) a temperatura ambiente que acelera de manera continua un haz de protones de 4 mA de intensidad a 17 MeV de energía. Los protones alcanzan su energía final de 600 MeV en las siguientes secciones de un linac superconductor. La longitud total del linac es de 400 m. Una vez por segundo, el haz se interrumpe durante 200 μ s para que se puedan realizar mediciones precisas en línea y monitorizar la subcriticidad del reactor. El haz se envía desde arriba, a través de una ventana de acero inoxidable, al blanco de espalación de LBE (refrigerante del reactor) dentro del núcleo del reactor MYRRHA.

La fiabilidad del acelerador es un elemento crucial para el funcionamiento de los ADS. Dos inyectores redundantes y una tolerancia de duración del disparo del haz de 3 s - el número de disparos del haz permitidos que superen los 3 s debe permanecer por debajo de 10 dentro de un ciclo operativo de 3 meses de MYRRHA - permiten obtener un valor de tiempo medio entre fallos superior a 250 h.

El volcado del haz es otra parte excepcional del diseño del acelerador, además de su alta fiabilidad, porque debe diseñarse para soportar la potencia total del haz de protones para así poder probar a fondo el funcionamiento del acelerador antes de que el haz se dirija al núcleo del reactor. Esto significa que se deposita una gran cantidad de energía en él, que debe eliminarse mediante un sistema de refrigeración adecuado sin perjuicio de la gran cantidad de blindaje que se necesita. Otro parámetro de diseño importante es la radiactividad del material del volcado del haz después de un largo tiempo de uso intensivo.

El SCK CEN está construyendo una configuración experimental de la primera parte del acelerador en colaboración con la Universidad Católica de Lovaina en Louvain-la-Neuve. De hecho, ya se ha construido el inyector de MYRRHA de hasta 1.5 MeV (Figura 4) y en junio de 2020 el equipo del acelerador envió el primer haz de protones desde la fuente de iones a través del cuadrupolo de radiofrecuencia, un componente crítico del acelerador de partículas que asistirá el reactor de investigación subcrítico, y lo aceleró a 1.5 MeV.



Figura 4. Inyector de MYRRHA en UCLovain

Los siguientes objetivos son aumentar la energía del haz a 2 MeV y, finalmente, a 5.9 MeV. Luego, el haz se someterá a una mayor optimización para llevar su fiabilidad al nivel requerido. Al alcanzar ese nivel, el acelerador lineal se transferirá al emplazamiento de MYRRHA en Mol.

ESTADO DEL PROYECTO Y PLANES FUTUROS

Entre los posibles escenarios que se barajaban en un principio, se eligió finalmente una implementación por fases en la que el acelerador será construido primero y el reactor después. Se prevén dos fases consecutivas para la construcción del acelerador de MYRRHA: 0 – 100 MeV en la Fase 1 y las secciones de 100 – 600 MeV en la Fase 2. La Fase 3 comprende la construcción del reactor y es una fase separada que se puede ejecutar en paralelo con o después de la Fase 2. La versión más reciente de la planificación del programa MYRRHA se presenta en la Figura 5.

El Gobierno Belga decidió apoyar un mayor desarrollo de MYRRHA con 60 M€ en 2010. Además, estaba previsto contribuir a su construcción a un nivel del 40% del coste total. Después del período 2010 – 2014, una nueva dotación específica para MYRRHA de 40 M€ fue concedida al SCK CEN para el 2016 – 2017.

El 7 de septiembre de 2018 se llegó a un acuerdo entre el Gobierno Belga y el SCK CEN para construir MYRRHA, una nueva gran infraestructura de investigación en Mol. Se asignó un presupuesto de 558 M€ para el período 2019 – 2038 para a) construir la Fase 1 (2019 – 2026) y b) su operación posterior (2027 – 2038) así como c) lograr avances significativos en las Fases 2 y 3 (2019 – 2026). Además, el Gobierno Belga solicitó al programa MYRRHA que estableciera una organización internacional sin ánimo de lucro a cargo de la instalación MYRRHA, para buscar e incorporar al proyecto socios internacionales.

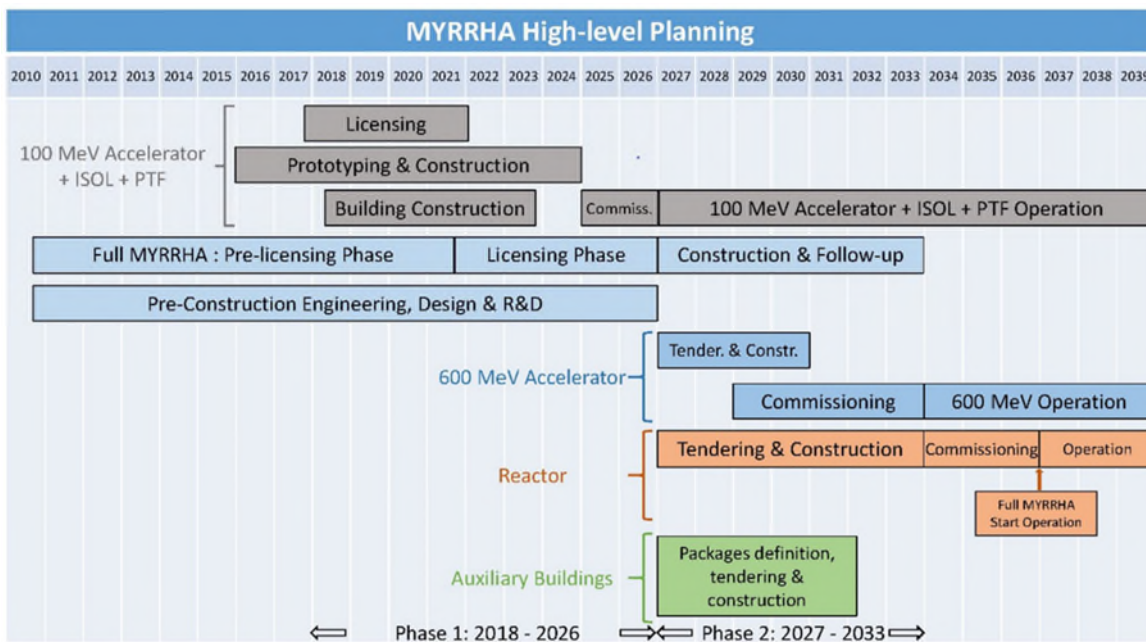


Figura 5. Planificación actual del proyecto MYRRHA

REFERENCIAS

- Aït Abderrahim, H.; De Bruyn, D.; Dierckx, M.; Fernandez, R.; Popescu, L.; Schyns, M.; Stankovskiy, A.; Van den Eynde, G.; Vandeplassche, D. MYRRHA Accelerator Driven System programme: recent progress and perspectives. *Nuclear Power Engineering 2* (2019) 29-41.
- Aït Abderrahim, H.; Baeten, P.; De Bruyn, D.; Heyse, J.; Schuurmans, P.; Wagemans, J. MYRRHA, a Multipurpose hYbrid Research Reactor for High-end Applications. *Nuclear Physics News 20* (2010) 24-28.
- De Bruyn, D.; Fernandez, R.; Baeten, P. The Belgian MYRRHA ADS Programme. Part 2: Recent developments in the reactor primary system. *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'18)*, Charlotte (NC), USA (2018).
- De Bruyn, D.; Fernandez, R.; Mansani, L.; Woaye-Hune, A.; Sarotto, M.; Bubelis, E. The fast spectrum transmutation experimental facility FASTEF: main design achievements (Part 1: core & primary system) within the FP7-CDT collaborative project of the European commission. *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'12)*, Chicago (IL), USA (2012).
- De Bruyn, D.; Larmignat, S.; Woaye-Hune, A.; Mansani, L.; Rimpault, G.; Artioli, C. Accelerator driven systems for transmutation: main design achievements of the XT-ADS and EFIT systems within the FP6 IP-EUROTRANS integrated project. *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'10)*, San Diego (CA), USA (2010).
- Engelen, J., Aït Abderrahim, H., Baeten, P., De Bruyn, D.; Leysen, P. MYRRHA: Preliminary front-end engineering design. *International Journal of Hydrogen Energy 40* (2015) 15137-15147.
- Eriksson, M. Accelerator-driven Systems: Safety and Kinetics. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm (2005).
- EU, Integrated Project EUROTRANS. Contract nr. FI6W-CT-2004-516520.
- Fiorito, L. Neutronic design of the MYRRHA core version 1.8. 2019 - Fifth international work on accelerator driven system (ADS) and thorium utilisation, Mol, Belgium (2019).
- MYRRHA Project website: <https://myrrha.be/>
- Van den Eynde, G.; Malambu, E.; Stankovskiy, A.; Fernandez, R.; Baeten, P. An updated core design for the multi-purpose irradiation facility MYRRHA. *Journal of Nuclear Science and Technology 52* (2015) 7-8.