

Aceleradores de partículas y energía nuclear: el desafío de la fiabilidad

R. Brucker y P. Fernández Ramos

Los aceleradores de partículas de alta energía, antes reservados a la investigación, serán utilizados pronto para aplicaciones industriales de la energía nuclear. En este contexto, estarán sometidos a unos requisitos de fiabilidad sin precedentes para este tipo de máquinas, y para poder cumplirlos, el desarrollo de estudios de fiabilidad es una necesidad. Este artículo describe la experiencia adquirida por Empresarios Agrupados en este sector (en los proyectos Eurotrans e Ifmif) y presenta sus futuras actividades en el marco del proyecto Myrrha, cuyo objetivo es la construcción del primer reactor de tipo ADS en el mundo.

High energy particle accelerators, that used to serve a purpose only in fundamental research, will soon be used in industrial applications of nuclear energy. In this context, they will be submitted to unprecedented (as far as such machines are concerned) reliability requirements. In order to meet them, reliability studies need to be carried out. This article describes the experience gained by Empresarios Agrupados in that field (with the Eurotrans and Ifmif projects) and presents their future activities in the framework of the Myrrha project, that is aimed at building the first ADS reactor in the world.

Si el uso de los aceleradores de partículas de alta energía estaba hasta hace poco reservado al campo de la investigación, está cada vez más relacionado con las aplicaciones industriales de la energía nuclear. Un ejemplo característico es el de los reactores de tipo ADS¹ (ver los proyectos Eurotrans y Myrrha descritos a continuación), aunque los aceleradores puedan ser utilizados en otros tipos de aplicaciones electronucleares (como en el proyecto Ifmif detallado más adelante).

La utilización de los aceleradores de partículas de alta energía para aplicaciones industriales implica someter esa tecnología a requisitos de fiabilidad mucho más estrictos que los que existían hasta ahora. El criterio que predominaba anteriormente en los aceleradores utilizados para la investigación era la disponibilidad, y existen en el mundo máquinas con excelentes resultados en este campo. Pero, si bien es necesaria una alta disponibilidad, no basta para una aplicación nuclear industrial, se requiere también una alta fiabilidad (en resumen, no es

suficiente que los fallos que ocurren no paren la operación del acelerador mucho tiempo, se requiere también que el número de fallos sea muy bajo). Este último aspecto constituye un desafío tecnológico, y abre un campo de gran interés dentro del mundo de los aceleradores de partículas. La fiabilidad debe ser el objetivo principal desde las primeras fases del diseño y se tiene que desarrollar una verdadera "cultura de fiabilidad". En este contexto, Empresarios Agrupados contribuyó a la primera generación de proyectos destinados a evaluar y mejorar la fiabilidad de los aceleradores de partículas, aportando los conocimientos adquiridos a lo largo de su amplia experiencia en el área de los estudios de fiabilidad.

CUANTIFICACIÓN PRELIMINAR DE LA FIABILIDAD DE UN ACCELERADOR POR MODELIZACIÓN DE TIPO MONTE CARLO (PROYECTO EUROTRANS – AÑO 2008)

Necesidad de cuantificar la fiabilidad

El objetivo del proyecto europeo Eurotrans (en parte financiado por la UE en el marco del FP6) era la concepción de un reactor capaz de utilizar un combustible principalmente constituido



ROMAIN BRUCKER

Licenciado en Ingeniería Industrial con la especialidad de Técnicas Energéticas por la Universidad Politécnica de Madrid (2008) y por el Ecole Centrale de Lille, Francia (2008).

Desde 2008 trabaja en Empresarios Agrupados, en el departamento de Seguridad Nuclear. Ha trabajado en los análisis de accidentes de las centrales de Almaraz y Trillo, en análisis de fiabilidad (aceleradores de partículas), y en análisis de riesgos.



PEDRO FERNÁNDEZ RAMOS

Ingeniero Industrial (1981). Especialidad Técnicas Energéticas por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.

Jefe de la Sección de Estudios y Fiabilidad. Departamento de Seguridad de Empresarios Agrupados.

¹Accelerator Driven System (Sistema Asistido por Acelerador en castellano).

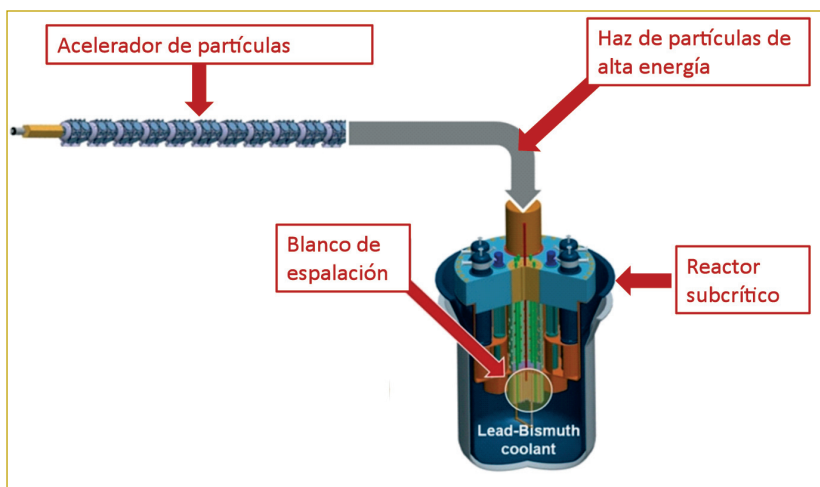


Figura 1. Diagrama de un sistema ADS.

por actínidos minoritarios. Tal reactor tiene dos fines: por un lado, la conversión de los actínidos minoritarios en elementos que tengan una vida media más corta (proceso llamado transmutación, fundamental para la gestión futura de los residuos de alta actividad) y, por otro, la producción de electricidad. Un combustible compuesto por actínidos minoritarios no puede ser quemado en un reactor crítico porque sería demasiado difícil de controlar. La solución desarrollada en el proyecto Eurotrans es utilizar este combustible en un reactor subcrítico alimentado por una fuente exterior de neutrones (obtenida mediante un acelerador de partículas y un blanco de espalación²), como se puede ver en la figura 1. Se denomina sistema ADS la combinación de un reactor subcrítico y de un acelerador de partículas.

Si los diseños de tipo ADS ofrecen perspectivas interesantes para la gestión de los residuos de alta actividad, también presentan aspectos tecnológicos de gran interés y complejidad, entre otras cosas porque la interacción entre el reactor y el acelerador tiene que ser perfecta. Cada fallo del acelerador introduce inmediatamente una pérdida de reactividad importante en el núcleo del reactor, y, como consecuencia, una disminución de la temperatura en el mismo. Las variaciones repetidas de temperatura de tanta magnitud y en tan poco tiempo suponen unas demandas muy elevadas para los materiales de los reactores tipo ADS, que pueden ser difíciles de cumplir y que, en cualquier caso, implican un interés en la reducción

del número de tales transitorios. Se entiende entonces porque, en un sistema ADS, la fiabilidad del acelerador es un tema fundamental. Para poder tener en cuenta la fiabilidad desde las primeras fases del diseño del acelerador (es decir, ser capaz de cuantificar el impacto sobre la fiabilidad de una modificación del diseño), es imprescindible tener una modelización del acelerador. Proponer una modelización preliminar del acelerador del proyecto Eurotrans fue la tarea que llevó a cabo Empresarios Agrupados en el año 2008.

Metodología utilizada

Se programó, utilizando Matlab, una simulación de tipo Monte Carlo del comportamiento del acelerador. En la simulación se caracteriza cada componente por la interacción que tiene con los demás componentes, y por sus valores de MTBF³ y MTTR⁴. El programa realiza una iteración sobre el tiempo, y calcula en función de la densidad de probabilidad de fallo asociada a cada componente, qué componentes fallan a lo largo del tiempo, y cuál es la consecuencia de las combinaciones de los distintos fallos sobre el acelerador.

Aspectos innovadores de la simulación

En primera aproximación, un acelerador lineal de partículas se puede asimilar a una cadena de cavidades de radiofrecuencia (cavidades de metal en estado superconductor en las cuales se proporciona energía a las partículas mediante ondas de radiofrecuencia, para acelerarlas) y de ima-

nes (para enfocar el haz de partículas) colocados en serie. Una representación simplificada se puede ver en la figura 2.

Se ha demostrado⁵ que el fallo de una cavidad de radiofrecuencia (RF) no lleva a la pérdida de función de toda la cadena sino que, bajo algunas condiciones, se puede compensar utilizando las cavidades RF próximas a la cavidad afectada (suministrando más energía y ajustando sus frecuencias). Una propiedad similar se ha demostrado para los imanes. Esta tolerancia ante los fallos de las cavidades y de los imanes ha sido incluida en la simulación, lo cual constituye una de las principales innovaciones.

Otro aspecto innovador es que la simulación tiene en cuenta la localización de un componente para determinar el tiempo afectado a su reparación. En efecto, la posibilidad de realizar una operación de mantenimiento sobre un componente está directamente relacionada con el nivel de radiación en la zona donde está situado dicho componente. Se han considerado en la simulación dos opciones para la localización de los componentes, o directamente en el túnel del acelerador (en cuyo caso no se puede realizar ninguna tarea de mantenimiento mientras el acelerador está operando) o bien en otro túnel distinto (cuyo blindaje permitiría el mantenimiento durante la operación).

Por último, se han modelizado en el estudio los sistemas auxiliares, como los sistemas de vacío (con el riesgo asociado de pérdida de vacío, que impide la propagación del haz) y los sistemas de refrigeración por agua (para las alimentaciones eléctricas de las antenas de radiofrecuencia y de los imanes).

CONSIDERAR LA FIABILIDAD COMO UN OBJETIVO FUNDAMENTAL DESDE LAS PRIMERAS FASES DEL DISEÑO DE UN ACELERADOR (PROYECTO IFMIF – AÑO 2009)

Un ejemplo significativo de la importancia cada vez mayor que se da a la fiabilidad, incluso en las fases preliminares del diseño de un acelerador, es el proyecto Ifmif⁶, realizado en el marco del proyecto ITER⁷. Para in-

² Material que convierte, mediante reacciones nucleares, las partículas cargadas incidentes (provenientes del acelerador) en neutrones (para bombardear el combustible).

³MTBF: Mean Time Between Failure (tiempo medio entre dos fallos de un componente).

⁴MTTR: Mean Time To Repair (tiempo medio para reparar o reemplazar un componente).

⁵"Beam Dynamics Studies for the Fault Tolerance Assessment of the PDS-XADS Linac Design" Jean-Luc Biarrotte, Marta Novati, Paolo Pierini, Henri Safa and Didier Uriot (CNRS, INFN y CEA).

⁶International Fusion Materials Irradiation Facility.

⁷International Thermonuclear Experimental Reactor.

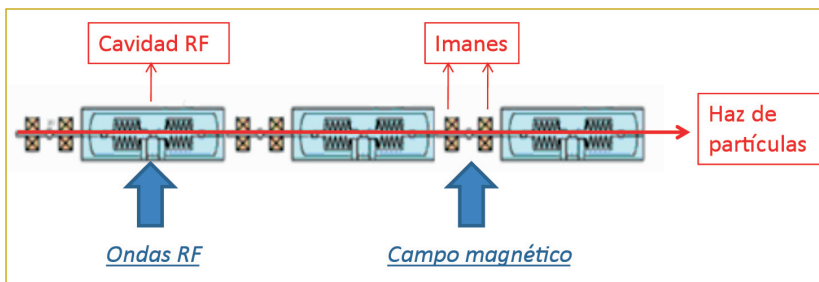


Figura 2. Representación simplificada de un acelerador lineal.

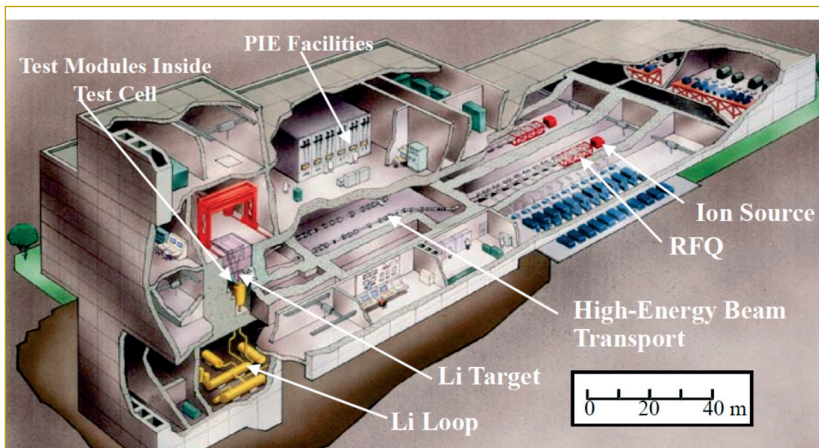


Figura 3. Representación 3D de las instalaciones del Ifmif.

vestigar sobre los fenómenos de activación de los materiales (un tema fundamental en el proyecto ITER), se decidió construir un centro de pruebas constituido principalmente por dos aceleradores de deuterones y un blanco de espalación (ver figura 3). Empresarios Agrupados realizó en el año 2009 un informe que proporciona directrices técnicas a considerar durante la fase de diseño con el fin de mejorar la fiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad tanto de los aceleradores como del blanco de espalación.

ESTUDIO DE FIABILIDAD DETALLADO DEL ACCELERADOR DEL PRIMER PROTOTIPO DE SISTEMA ADS (PROYECTO MAX - AÑO 2011)

Si es cierto que los reactores de tipo ADS han existido durante muchos años únicamente a nivel teórico, las cosas están cambiando ahora con el ambicioso desarrollo del proyecto Myrrha. Este proyecto, liderado por el SCK-CEN⁸, prevé la construcción en el emplazamiento de Mol en Bélgica de un reactor experimental con una potencia de 50-100 MW_{th} acoplado a un acelerador de protones de una energía de 600 MeV, y cuya operación debería empezar en el año 2023.

⁸Centro de investigación nuclear belga situado en Mol.

Uno de los numerosos desafíos del proyecto Myrrha es el desarrollo de un estudio de fiabilidad detallado del acelerador de partículas, no sólo como sistema aislado, sino teniendo en cuenta también su interacción con el reactor subcrítico. En este marco nació el proyecto MAX⁹ (subproyecto del proyecto Myrrha, dedicado específicamente al acelerador) que cuenta con la participación de varios centros de investigación y empresas europeas, y está incluido en el 7º Programa Marco de la UE. En el proyecto MAX, liderado por CNRS¹⁰ /IN2P3¹¹, Empresarios Agrupados se encargará del análisis de fiabilidad, una tarea compleja dividida en dos fases. La primera es la realización del estudio de fiabilidad detallado de un acelerador actualmente en operación. Existen varios aceleradores (especialmente en EEUU, Japón, o Suiza) que aportan experiencia de operación y serían de gran interés para este estudio. Se desarrollarán los árboles de fallos hasta

⁹MAX: Myrrha Accelerator eXperiment, research and development program.

¹⁰CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique, centro de investigación francés.

¹¹IN2P3: Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (centro de investigación francés, que forma parte del CNRS).

el mejor nivel de detalle que permita la información disponible (diseño del acelerador, valores de MTBF y MTTR basados en la experiencia operacional...etc). También se incluirá, en la medida que lo permita la información disponible, una modelización de los sistemas auxiliares, especialmente del sistema de control (que puede tener un papel clave con respecto a la fiabilidad). El objetivo de esta primera fase es verificar la validez del modelo de fiabilidad, comparando sus resultados con datos de operación reales.

Una vez se haya validado la metodología de estudio de la fiabilidad en esta primera fase, se desarrollará en la segunda fase el estudio de fiabilidad del acelerador de protones del Myrrha. Es de notar que este estudio se tendrá que realizar en paralelo con la fase de diseño del acelerador, con las dificultades e incertidumbres que supone esta situación. Por lo tanto, es de crucial importancia haber validado la metodología de estudio en la primera fase. Por otra parte, se espera que los resultados proporcionados por el estudio de fiabilidad aporten información valiosa que pueda ser tenida en cuenta en el desarrollo del diseño de la instalación del Myrrha.

CONCLUSIONES

La utilización de los aceleradores de partículas de alta energía para futuras aplicaciones industriales relacionadas con la energía nuclear somete esa tecnología a unos requisitos de fiabilidad sin precedentes para esas máquinas. Cumplir con estos requisitos constituye un verdadero desafío, que impone hacer de la fiabilidad un objetivo fundamental del diseño. Para hacerlo, es necesario desarrollar una metodología que permita evaluar la fiabilidad con el grado de precisión requerido.

La larga experiencia adquirida por Empresarios Agrupados en el área de los estudios de fiabilidad le permitió participar a los primeros proyectos de este tipo en el campo de los aceleradores de partículas, mediante los proyectos Eurotrans (2008) e Ifmif (2009). Desde que empezó el proyecto Myrrha, la concepción de un reactor de tipo ADS es más que nunca un tema de actualidad. En el marco de este proyecto (mediante el proyecto MAX), Empresarios Agrupados realizará el estudio de fiabilidad del acelerador de lo que tiene por objetivo ser el primer prototipo de reactor de tipo ADS en el mundo. ■