

Resumen

El continuo afán por reducir la cantidad de actínidos minoritarios (MA) procedentes del combustible quemado en los reactores de agua ligera (*Light Water Reactor*, LWR) y de esa forma reducir la radiotoxicidad, ha llevado a desarrollar nuevos conceptos de combustible nuclear. El nuevo combustible por empacquetamiento de esferas (*Sphere-Pac*, SP) ofrece la oportunidad de reintroducir los MA en una matriz y quemarlos en un reactor rápido de neutrones, donde se facilitan ciclos múltiples por transmutación de elementos. Este combustible se puede utilizar también en un sistema subcrítico rápido de neutrones, es decir, un sistema nuclear accionado por un acelerador de partículas (*Accelerator Driven System*, ADS), donde la subcriticidad (seguridad de parada del reactor) permite utilizar combustibles con mayor contenido de MA que en un reactor normal, reduciendo eficazmente en un solo paso la radiotoxicidad.

El combustible SP se produce a partir de una solución base (formada por metales y elementos químicos) mediante un proceso de gelificación interna. Este proceso garantiza una buena homogeneidad del producto final y un riesgo de contaminación mucho menor si se compara con la fabricación clásica de *pellets* (combustible comprimido), puesto que se evita el uso de prensas y amoladoras. La gelificación interna es una reacción química acuosa que se produce al calentar la solución hasta $80 \pm 5^\circ \text{C}$. Cuando se realiza el proceso por calentamiento electromagnético, se observan algunas ventajas con respecto al calentamiento tradicional por conducción (contacto de la muestra con aceite de silicio precalentado): se evita la etapa de reciclado del aceite y de los disolventes orgánicos necesarios para eliminar el aceite de la superficie de las partículas producidas. En la unidad de gelificación interna por microondas (*Microwave Internal Gelation*, MIG), las microondas representan una alternativa mucho más simple y segura: el calentamiento volumétrico sin contacto facilita la producción a distancia del combustible en celdas calientes y además reduce los residuos de líquido contaminado.

Esta tesis se enmarca dentro del proyecto *Platform for Innovative Nuclear FuEls* (PINE), que tiene como objetivo fundamental la producción de combustible SP por MIG. En el sistema MIG, el tiempo de calentamiento es muy corto (del orden de decenas de milisegundos), por lo que se deben optimizar los parámetros que contribuyen al calentamiento por microondas

y es necesario conocer en profundidad la interacción entre las microondas y las muestras.

En la primera parte de este trabajo se investiga un modelo térmico basado en diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), el cual es capaz de determinar, en cada instante durante el proceso de calentamiento, el comportamiento térmico de un punto definido dentro del material que se calienta. Además se presenta una descripción detallada de los parámetros más relevantes del modelo, incluyendo las condiciones de contorno (entre ellas la convección). Por otra parte, se implementa analíticamente y se valida con diferentes técnicas: una basada en teoría de la física, otra basada en la herramienta de ecuaciones diferenciales parciales (PDEtools) y la última basada en ejemplos encontrados en la literatura.

En segundo lugar, se investigan los posibles diseños de cavidades de microondas para su aplicación en MIG. Tanto las cavidades (selección de los modos, frecuencia de resonancia, factores de calidad, etc.) como su posterior caracterización, se detallan con el objetivo de especificar el acoplamiento de energía. Los mecanismos de transferencia de energía de las cavidades se explican utilizando el método de perturbación, con el que además se analizan las pérdidas de la cavidad cuando se coloca una muestra dieléctrica en su interior. Con el modelo de transferencia de energía desarrollado, se obtiene la tasa de generación de calor por microondas, que se aplica al modelo térmico FDTD mencionado anteriormente. Los resultados analíticos demuestran la viabilidad de producir esferas gelificadas por MIG.

Seguidamente se introducen los principales parámetros relacionados con el calentamiento de un material por microondas, es decir, las propiedades dieléctricas. Se desarrolla un nuevo procedimiento que permite medir estas propiedades en gotas que caen libremente a través de una cavidad de microondas. Se presenta el montaje experimental, cuya viabilidad se prueba a través de diferentes experimentos. Las propiedades dieléctricas medidas se incluyen en los modelos (perturbacional y térmico) con la intención de determinar la potencia absorbida por la sustancia (en forma de gotas) y la temperatura que alcanza.

En la última parte se presenta la implementación del sistema MIG aplicada al proyecto PINE, fundamental para la práctica de calentamiento (basado en frecuencias altas) dentro del laboratorio. Las propiedades de cada dispositivo se evalúan para realizar un estudio de potencia antes del ensamblaje del sistema MIG. De esa forma se evitan fallos al poner el sistema en funcionamiento. Además se aportan las técnicas experimentales y

los resultados. La producción con éxito de esferas gelificadas demuestra, sin duda, el uso favorable de las microondas en la producción de combustible SP por gelificación interna.

Palabras Clave: Gelificación Interna por Microondas, Combustible por Empaquetamiento de Esferas, Cavidades Resonantes, Frecuencia de Resonancia, Factor de Calidad, Propiedades Dieléctricas, Método Perturbacional.

