

De TMI a Fukushima: retos y realidades en la estabilidad de reactores nucleares



*Dr. Alfonso Prieto Guerrero
Dr. Gilberto Espinosa Paredes
División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa*



Abstract

Today, the demand for more clean electrical energy has increased. One of the solutions is nuclear energy, whose detractors put special emphasis on the safety of nuclear power plants. However, during the last past 50 years, important efforts have been made in order to maintain high levels of security in Boiling Water Reactors, especially in the core inside, keeping in reasonable high-power levels of operation with no problems in the controlled fission reactions. Although there is a new generation of nuclear power plants with reactors called Generation IV, in the practice the total replacement of Boiling Water Reactors is still a long way off. For these reasons, we present in this work, a brief introduction of different approaches or methods used to establish or implement real stability monitors in nuclear power plants based on Boiling Water Reactors. The goal of this work is not to be exhaustive but just to introduce general ideas or realities about the problem of stability in this kind of reactors.

Keywords: Boiling Water Reactors, Stability Monitors, Density Wave, Decay Ratio

Resumen

Hoy en día, la exigencia de tener más energía eléctrica limpia se ha incrementado. Una de las soluciones es la energía nuclear, cuyos detractores ponen especial énfasis en materia de la seguridad de las centrales nucleares. Sin embargo, durante los últimos 50 años se han realizado importantes esfuerzos para mantener altos niveles de seguridad en los tipos de reactores que operan actualmente en la gran mayoría de las centrales nucleares, denominados Reactores de Agua en Ebullición, especialmente en el interior de sus núcleos,

manteniendo niveles razonables de operación a altas potencias y sin problemas en las reacciones de fisión controladas que ocurren al interior de los mismos. Aunque existe en proceso una nueva generación de centrales nucleares con reactores denominados Generación IV, aún dista mucho la sustitución total de los Reactores de Agua en Ebullición. Por estas razones, presentamos en este trabajo, a modo de breve introducción, diferentes enfoques o métodos utilizados para establecer o implementar monitores reales de estabilidad en las centrales nucleares basadas en Reactores de Agua en Ebullición. El objetivo de este trabajo no es ser exhaustivo sino simplemente introducir ideas generales o realidades sobre el problema de la estabilidad en este tipo de reactores.

Palabras Claves: Reactores de Agua en Ebullición, Monitor de Estabilidad, Onda de Densidad, Razón de Decaimiento

1. Motivación

Las actividades humanas son las principales causas del cambio climático por la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas. Las alternativas energéticas que incluyen las renovables y la energía nuclear, son atractivas por la baja o nula emisión de gases de efecto invernadero (bióxido de carbono: CO_2), durante la **generación de energía eléctrica**. No obstante, ante la inminente transición energética para la descarbonización queda demostrado que las energías renovables no son suficientes para hacer frente a las necesidades humanas, por la intermitencia que las ubica con factores de carga muy bajos (aprovechamiento de la capacidad instalada). Este último aspecto no está presente en la energía nuclear, que además de que su funcionamiento no pro-

duce emisiones de gases contaminantes; es una tecnología segura y continua con una amplia experiencia operativa.

Cuando ocurre un accidente en una central nuclear, el impacto en la opinión de la sociedad es importante, por ello las centrales nucleares de generación de potencia son más seguras que las centrales convencionales. En este sentido, el desarrollo de metodologías predictivas son una herramienta crucial para evitar accidentes, como por ejemplo las posibles inestabilidades en Reactores Nucleares de Agua en Ebullición (BWR). En México la Central Nuclear Laguna Verde tiene operando 2 reactores nucleares en forma segura y eficiente, desde hace más de 60 años entre las dos, y después de la modernización y del incremento en su potencia, éstas estarán operando otros 60 años.

La energía nuclear en el mundo representa en 70 años representa 19170 años-reactor. Usaremos el término de accidente severo para referirnos al daño del reactor nuclear con liberación de material radiactivo. Históricamente se han registrado tres de uso comercial: Three Mile Island (TMI, Estados Unidos) en 1979 y Chernóbil (Ucrania) en 1986, debido principalmente a errores humanos, y el tercero en 2011 debido a un terremoto que originó un maremoto con olas de más de 14 metros en Fukushima (Japón). Solo se registran pérdidas humanas, debido a las fallas en uno de los cuatro reactores, en Chernóbil. Estos eventos han generado lecciones aprendidas, que sirvieron para replantear la seguridad en las centrales nucleares del mundo.

La nueva tecnología de reactores nucleares, denominada Generación IV, está diseñada contra accidentes severos y algunos

de ellos operan prácticamente a presión atmosférica, y con eficiencias cercanas o superiores al 40%. Los pequeños reactores (potencias instaladas inferiores a 300MWe), basados en estas tecnologías son de interés para un despliegue nuclear en Europa y Asia, después que la energía nuclear se declaró como limpia.

A través de décadas la aceptación pública de los reactores nucleares es mayor, debida su confiabilidad y a los grandes beneficios que ésta ha aportado al mundo, y se sabe científicamente que es una energía que puede contribuir de forma positiva, en un plazo menor en el problema del calentamiento global y sus consecuencias. Existen países donde la aceptación nuclear de la población es mayor al 50% (Estados Unidos y Francia). En cambio, México es el segundo lugar con menor aceptación con el 19% y el promedio es de 38% en 28 de 31 países que tienen operando reactores nucleares (Kartono et al., 2023).

2. ¿Qué es un reactor nuclear?

Los reactores nucleares producen reacciones nucleares de fisión controladas, durante este proceso se producen fragmentos de fisión y neutrones que son útiles para mantener una reacción en cadena. Los fragmentos de fisión son átomos pesados que poseen la mayor parte de energía generada en la fisión en forma de energía cinética. La energía cinética se disipa en los combustibles nucleares incrementando su temperatura y se hace circular un refrigerante que puede ser agua, metales líquidos o un gas, para remover el calor generado en los combustibles nucleares. Para controlar la potencia del reactor se utilizan barras de control con alta absorción de neutrones, dependiendo del arreglo las barras se pueden insertar de arri-

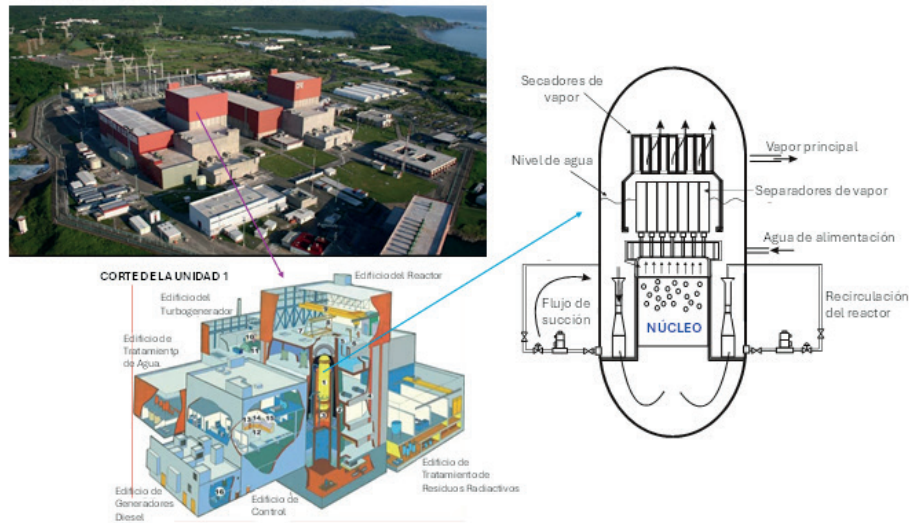


Figura 1. Nucleoeléctrica de Laguna Verde, Veracruz, México.

ba hacia abajo o viceversa, o también son de tipo giratorias. El comportamiento de los neutrones se encuentra en equilibrio con las condiciones “ambientales” del reactor, algún cambio de éste repercute en la disminución o producción de reacciones de fisión. En la Figura 1, se muestra una foto de los dos edificios que albergan los dos reactores (unidades) en la central nuclear de Laguna Verde y se representa un reactor nuclear en forma esquematizada. En el núcleo es donde se llevan a cabo los procesos antes mencionados.

3. ¿Es seguro un reactor nuclear?

Existen dos factores importantes en el diseño de los reactores nucleares, que los hacen imposibles de producir una explosión de tipo atómico. En primer lugar, es la geometría y en segundo lugar la cantidad de material fisionable que en los reactores comerciales es despreciable comparado con un artefacto nuclear para propósitos bélicos.

Entonces ¿qué pasó en TMI, Chernóbil y Fukushima? En todos ellos fue la falta de refrigerante por diferentes causas, lo que

ocasionó un sobrecalentamiento de núcleo, llegando al punto de fusión de algunos materiales críticos generado una explosión de tipo químico por las altas concentraciones de hidrógeno.

En el caso de Fukushima, las detonaciones de hidrógeno fueron controladas. Además, es importante mencionar existen 5 barreras de contención de material radiactivo (pastilla de combustible, las barras de combustible, vasija del reactor, contención primaria y edificio del reactor)

4. La Onda de Densidad en BWR y su importancia en la estabilidad del reactor

Una de las preocupaciones principales es determinar con anticipación una posible inestabilidad del reactor, en especial de su núcleo. El tipo de inestabilidad más común que se ha observado en los reactores BWR comerciales es la denominada inestabilidad de *onda de densidad* (OD) (Prieto-Guerrero y Espinosa-Paredes, 2019). En forma muy breve a continuación se describe el mecanismo que generan este fenómeno.

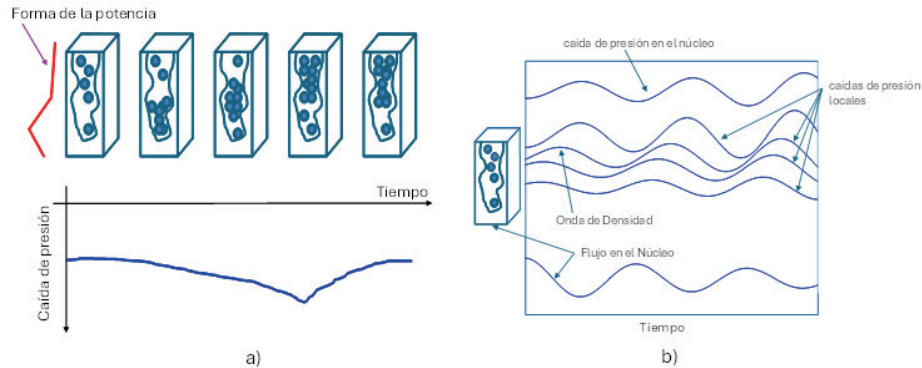


Figura 2. a) El mecanismo de onda de densidad introduce un retraso. El efecto de un pulso de potencia se ve unos segundos después en la caída de presión del canal. b) Onda de densidad al interior del núcleo.

Una reducción estacional del flujo de entrada en un canal o núcleo calentado aumenta la tasa de aumento de la entalpía, lo que reduce la densidad promedio. Esta perturbación afecta la caída de presión y el comportamiento de transferencia de calor. Para ciertas combinaciones de disposición geométrica, condiciones de operación y condiciones límite, la perturbación puede adquirir una fluctuación de presión fuera de fase de 180° en la salida, transmitida inmediatamente al caudal de entrada y volverse autosostenida. Para los sistemas de ebullición, las oscilaciones se deben a múltiples retroalimentaciones regenerativas entre la velocidad de flujo, la tasa de generación de vapor y la caída de presión.

Dado que los retrasos en el transporte son de suma importancia para la estabilidad del sistema, también se ha utilizado la frase “oscilaciones de retardo de tiempo”. Hablando de forma práctica, se trata de oscilaciones de baja frecuencia (centradas alrededor de 0.5 Hz) en las que el periodo es aproximadamente una o dos veces el tiempo requerido para que una partícula de fluido viaje a través del núcleo.

En consecuencia, las oscilaciones de onda de densidad y el mecanismo de efecto de densidad también se utilizan para describir los fenómenos. La Figura 2 ilustra los mecanismos que generan la OD, donde los circulitos representan la fase gaseosa.

5. ¿Cómo detectar de forma temprana la Onda de Densidad?

5.1 Sistema de Monitoreo

En términos generales, los reactores BWR cuentan con un sistema de instrumentación especial para el monitoreo de flujo de neutrones al interior de sus núcleos. Dicho sistema monitorea la potencia del reactor y genera señales de acción automáticas para la protección de éste.

A lo largo y ancho del núcleo, se instalan pequeñas cámaras de fisión que, al interactuar con los neutrones originados en las reacciones de fisión, generan partículas alfa. Estos detectores, llamados monitores locales del rango de potencia o simplemente LPRM, generan un pulso eléctrico (por efecto de ionización de las partículas alfa) que se procesa con amplificadores. Tales amplificadores de flujo convierten la señal

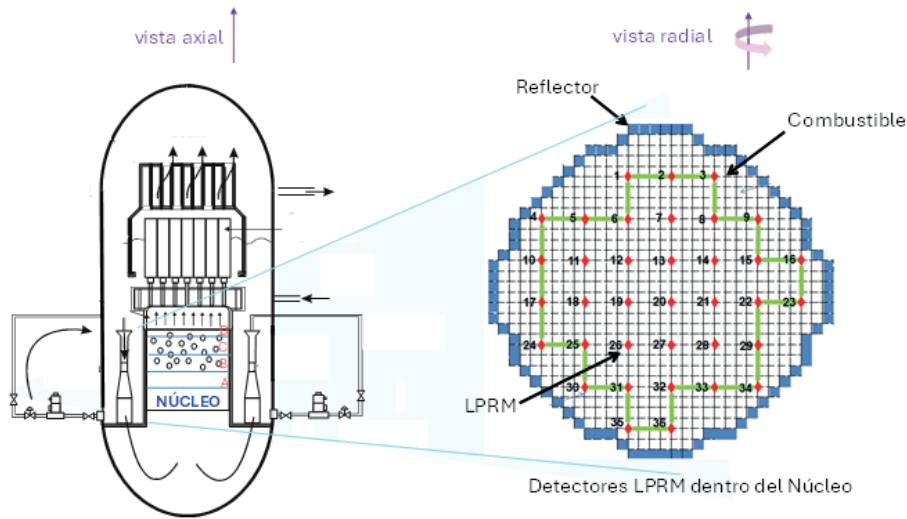


Figura 3. Localización axial y radial de los LPRM al interior del núcleo de un BWR.

de corriente en una señal de voltaje analógica. Hay un amplificador para cada detector LPRM. La ganancia del amplificador se puede ajustar en función del agotamiento del uranio dentro del detector. La salida del amplificador está calibrada para dar lecturas en unidades de Watts/cm² (flujo de calor por unidad de área). Las señales LPRM también se utilizan para controlar el sistema de protección del reactor (RPS) para la seguridad del reactor.

Los LPRM se colocan verticalmente dentro del núcleo, separados entre sí por una distancia predeterminada a lo largo del núcleo, como se muestra en la Figura 3. El primer LPRM se encuentra a una distancia por encima del fondo del combustible activo. De abajo hacia arriba, los detectores se designan con las letras A, B, C y D. El cable de cada detector termina debajo del recipiente del reactor que se conecta al conector. Hay cables coaxiales que transmiten la señal del reactor a través de la contención primaria hacia el gabinete de monitoreo.

Los LPRM se colocan en niveles que se distribuyen en la dirección radial del nú-

cleo como se muestra en la Figura 3. Esta figura muestra con puntos rojos un total de 36 LPRM de un piso o nivel de reactor. En específico, el reactor de la nucleoelectrica de Laguna Verde (LV), localizada en el estado mexicano de Veracruz, tiene un total de 4 niveles conteniendo 24 LPRM en cada uno de estos niveles. Eso hace un total de 96 LPRM que se alimentan a 4 monitores APRM, cada APRM es el promedio de los 24 LPRM de cada nivel del reactor.

5.2 Parámetro de estabilidad: DR

Actualmente, el parámetro más común para evaluar la estabilidad de un BWR se conoce como razón de decaimiento o simplemente DR (del inglés Decay Ratio). Para entender el resultado de la onda de densidad y las mediciones obtenidas en los LPRM, en la Figura 4, se muestra una señal real de inestabilidad típica ocurrida en un BWR.

Aquí puede observarse como al final de la señal, enmarcada en rojo, la onda de densidad está claramente presente e incrementándose con el tiempo. Cabe mencionar que, dado el aumento significativo

de la potencia de ésta, el reactor se apagó manualmente antes de que actuaran los sistemas automáticos de apagado. La parte enmarcada en color verde muestra un comportamiento completamente diferente: amplitudes aleatorias alrededor del valor nominal de la potencia de trabajo del reactor. En esta zona el reactor está en estado estable. La parte marcada en amarillo podría considerarse como una zona de transición donde, como lo muestran algunos análisis, la OD empieza a aparecer. Por ello, la importancia de detectar la OD al momento de su aparición y poder aplicar las medidas de seguridad para evitar que ésta crezca. De aquí la importancia de la implementación de monitores de estabilidad en los reactores nucleares.

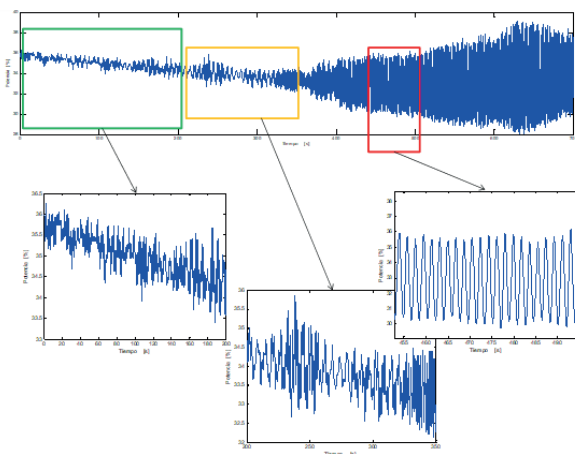


Figura 4. Inestabilidad en uno de los reactores de LV ocurrida en noviembre de 1995.

Un monitor sencillo podría ser implementado simplemente midiendo directamente los cruces por cero en el tiempo para confirmar la presencia de la señal que se repite (periódica) alrededor de los 0.5 Hz (periodo de 2 s) confirmando la aparición de la OD después de N periodos consecutivos (T_i) y al mismo tiempo detectar los incrementos en los cambios de amplitud (DR)

en las señales obtenidas con los LPRM, como se muestra en la Figura 5.

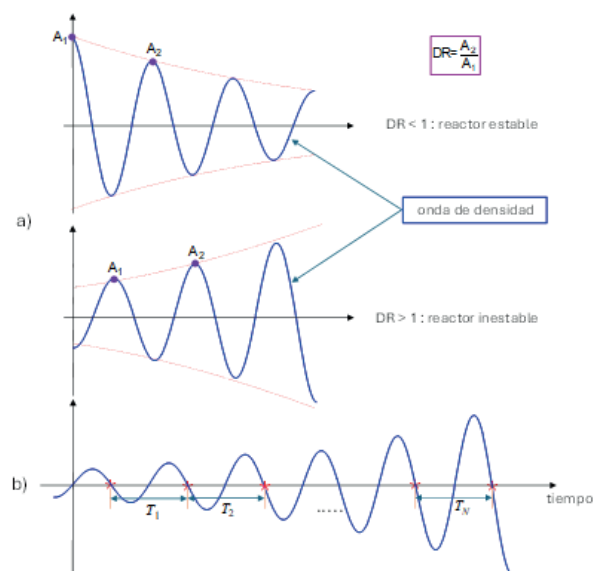


Figura 5. (a) Definición del parámetro de estabilidad DR y (b) confirmación de la frecuencia de la OD a través de la repetición de ésta a lo largo del tiempo.

Este método tiene la desventaja que solo puede detectar la inestabilidad cuando ésta ya está en fase creciente. Además, si las señales recibidas de los LPRM no están lo suficientemente “limpias”, el método puede fallar al no detectar adecuadamente los cruces por cero y de esta forma perder uno o más periodos consecutivos de la OD.

6. 50 años de investigación en la estabilidad de reactores nucleares: realidades y retos futuros
El DR originalmente no se define directamente sobre la señal monitoreada a través de los LPRM, si no a través de un modelo que aproxima el comportamiento dinámico del núcleo del reactor. El vínculo que liga la entrada (flujo neutrónico) y salida (potencia de las señales LPRM) en un sistema (núcleo del reactor) se denomina

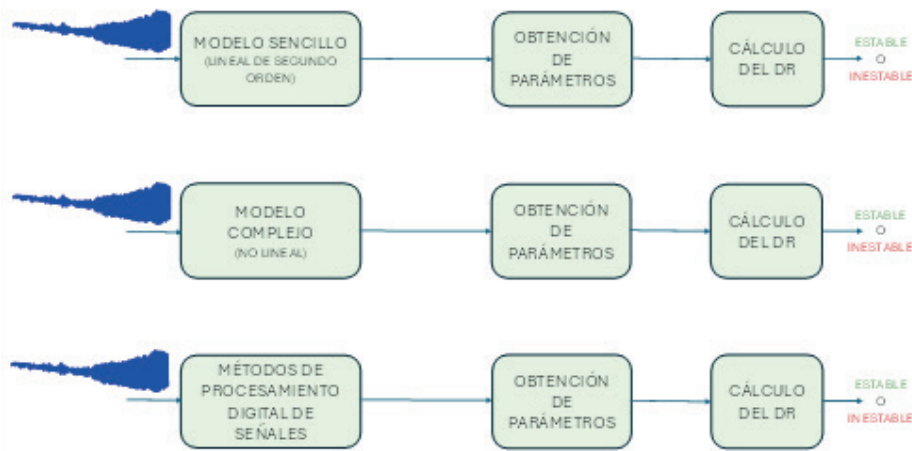


Figura 6. Esquema para determinar si el núcleo está estable o inestable a partir de las señales obtenidas con los LPRM y el DR.

función de transferencia. A partir de este vínculo y considerando un modelo sencillo (denominado lineal de segundo orden), el DR está ligado con los parámetros de esta función de transferencia y es una medida confiable para monitorear la estabilidad de este tipo de sistemas.

Las primeras propuestas para obtener el DR, basado en este modelo, aparecen en los años 70. Posteriormente en los años 80 aparece una nueva propuesta de modelo más complejo (denominado no lineal) que incluía elementos más complejos de la dinámica de los procesos que ocurren al interior del núcleo de los BWR. A finales de los 80 y en los 90, pero principalmente a principios de este siglo (2000's) aparecen otras propuestas que quitaban la idea del modelo, tanto sencillo como complejo, e introducían métodos alternativos para analizar directamente las señales de los LPRM, extrayendo información importante contenida en ellos que serviría de base para el cálculo del DR. Estas técnicas o métodos se denominan genéricamente como técnicas de procesamiento (digital) de señales. La idea en general es la misma que la de los

modelos: extraer parámetros que permitan identificar o calcular el DR. El esquema presentado en la Figura 6 es muestra de esto. Al final todas las propuestas permiten determinar si el núcleo está estable o no, como resultado de la detección de la onda de densidad. En la Figura 7, algunas de estas técnicas empleadas del procesamiento de señales son mencionadas.

Para la validez del DR es de suma importancia suponer que el BWR se comporte como este modelo sencillo (o incluso como el modelo complejo). Esta suposición es irreal en la práctica, los BWR reales son un sistema con un comportamiento muy complejo bajo inestabilidad, por lo tanto, un modelado simple lineal no es suficiente para evaluar la estabilidad de éste. Debido a esto, es relevante estudiar y proponer otros indicadores (parámetros) de estabilidad más sofisticados para evaluar la estabilidad de un BWR y sobre todo detectar una incipiente onda de densidad.

Las propuestas en este sentido, de utilizar un nuevo parámetro de estabilidad, han sido relativamente pocas debido a la reti-

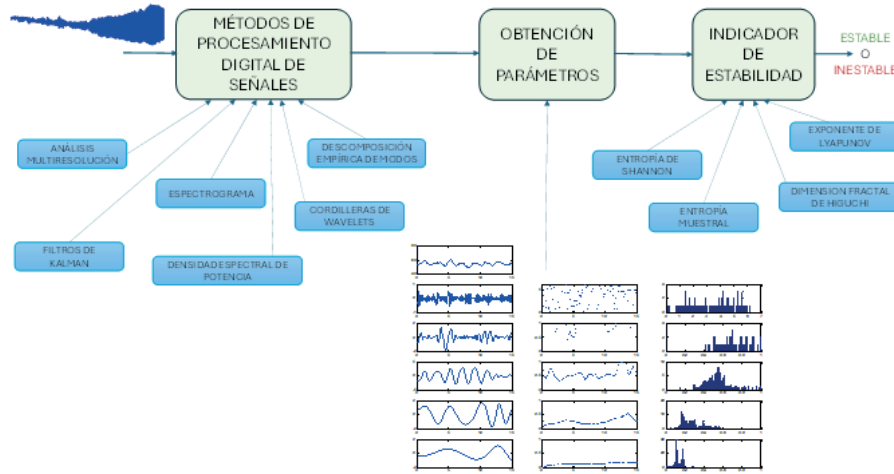


Figura 7. Esquema para determinar si el núcleo está estable o inestable a partir de las señales obtenidas con los LPRM y otros indicadores de estabilidad diferentes al DR.

cencia al cambio en la industria nuclear. Sin embargo, esto no significa que desde el punto de investigación de punta estos esfuerzos no sean relevantes. Los parámetros de estabilidad propuestos entran dentro de una categoría denominada no lineales. En la Figura 7 se esquematiza de nuevo el proceso para determinar si el núcleo es estable o no. La diferencia con la Figura 6 es de cambiar el DR por algún indicador de estabilidad no lineal como las denominadas entropías (Shannon, Muestral, de Aproximación, etc.) o como el exponente de Lyapunov o la Dimensión Fractal de Higuichi. Sin embargo, en una implementación práctica en una central nuclear, algunos de estos parámetros pueden ser no útiles debido al poder de cómputo necesario para su cálculo, o a la cantidad de muestras de la señal analizada, o incluso que no permita diferenciar correctamente cuando la onda de densidad está creciendo en potencia. Por supuesto, que la detección correcta de la OD es prioritaria en todos los casos, por ello es necesario emplear métodos sofisticados de procesamiento de señales como los que se indican en la figura. Estas pro-

puestas de investigación han tomado auge en los últimos 20 años.

¿Hacia dónde vamos? Dado la cantidad de datos de que disponen todas las centrales nucleares al monitorear constantemente los núcleos y capacidad de cómputo y procesamiento de datos, entonces es factible suponer que los grupos de investigación que se dedican a la parte de estabilidad estén trabajando con técnicas de inteligencia artificial, en específico en el denominado aprendizaje automático (*machine learning*), en especial la utilización de las redes neuronales a través del aprendizaje profundo (*deep learning*). Estas redes de última generación requieren de una cantidad de datos enorme para “aprender” e identificar patrones específicos, en este caso de detectar la OD incipiente como se muestra en la Figura 8. La diferencia entre una red “clásica” y una de “aprendizaje profundo” está en el número de capas que las integran, las primeras generalmente tienen una o dos capas ocultas y las otras requieren mucho más para poder identificar adecuadamente los patrones estudiados. El problema de

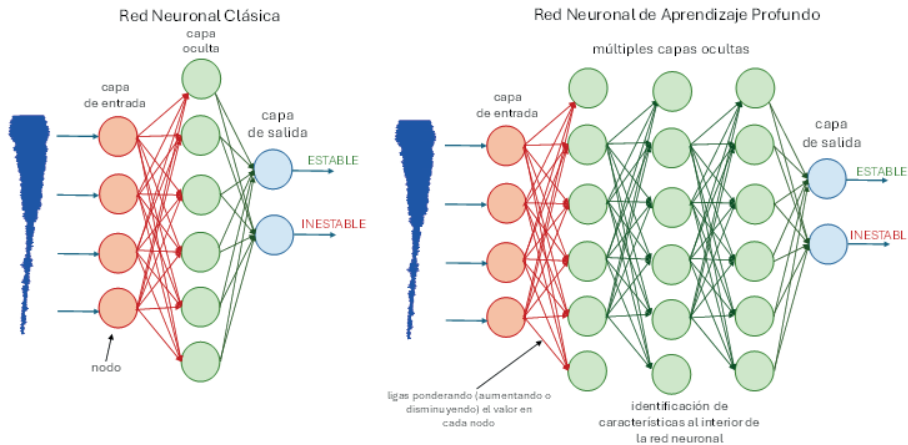


Figura 8. Las redes neuronales y su aplicación en la estabilidad de BWR.

ambas es el entrenamiento que requiere una gran cantidad de datos (señales LPRM de larga duración) para su correcto funcionamiento. En el caso de los BWR, podrían funcionar adecuadamente si se entrena a la red y los parámetros obtenidos, que conforman los nodos de las capas ocultas, no varían durante todo el tiempo que se esté utilizando esta red. Así solo se tendrían dos salidas posibles estable o inestable. Las entradas a la red pueden ser directamente la señal LPRM (no recomendable) u otros parámetros alternativos obtenidos previamente con alguna técnica de procesamiento de señales.

Desafortunadamente estos datos reales no están disponibles, por cuestiones de alta seguridad nacional, al público en general, por eso es importante generar marcos de referencias (*benchmarks*) a nivel internacional con muchos datos actuales para poder procesar y proponer nuevas herramientas basadas en la inteligencia artificial. Este esfuerzo de los marcos de referencias ya fue hecho originalmente en los años 1996 y 2001, cuando se hicieron pruebas controladas de inestabilidad en dos reactores nucleares suecos: Ringhals

(Lefvert et al., 1996) y Forsmark (Verdú et al., 2001). Estos marcos de referencias en la actualidad no son suficientes para probar técnicas como el aprendizaje profundo porque los datos recabados representan relativamente pocos segundos de estudio. Este es uno de los enormes retos en la industria nuclear y la investigación.

7. Conclusiones

La necesidad de generar cada día más energía eléctrica “verde” o “limpia”, nos confronta sobre la decisión de escoger sobre las actuales energías renovables que presentan intermitencia en el servicio y la clásica generación basada en combustibles fósiles. Esta disyuntiva, nos lleva a la alternativa de la energía nuclear. Esta energía, aunque considerada limpia, representa un reto en la aceptación por parte de la población en general debido a la idea de un posible accidente que genere una radiación nuclear que se disperse en la Tierra. En este artículo, se pretende hacer énfasis en el uso de la energía nuclear en la generación de energía eléctrica y los elementos de seguridad que conlleva la generación de la misma. Por esto, se presentan los elementos de implementación y

de investigación en el tema de seguridad en los principales reactores que existen actualmente en operación en centrales nucleoelectricas, a saber, los reactores de agua en ebullición.

Por supuesto, la nueva generación de reactores nucleares, cuya puesta en marcha apenas comienza, lleva como primicia evitar ante todo un accidente severo. Sin embargo, el riesgo cero no existe y siempre debemos estar innovando en técnicas y procedimientos que permitan detectar a tiempo una posible inestabilidad en este tipo de sistemas.

Referencias

Kartono, D. T., Hastjarjo, S., Sajidan, Effendi, B. S., Ashari, D. K., Wijayanto, P. K., Christy, A. Y., Acceptable Level of Acceptance and the Affecting Factors: What Is the Acceptable Public Acceptance of

Building a Nuclear Power Plant, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Artículo 8923578, 2023.

Lefvert, T., OECD/NEA Ringhals 1 Stability Benchmark, Final Report, NEA/NSC/DOC (96) 22, *Nuclear Energy Agency*, Nov. 1996.

Prieto-Guerrero A. and Espinosa-Paredes G., *Linear and non-linear stability analysis in Boiling Water Reactors, the design of real-time stability monitors*, Woodhead Publishing (Elsevier). ISBN: 978-0-08-102445-4, 2019.

Verdú G., Ginestar D., Muñoz-Cobo J. L., Navarro-Esbrí J., Palomo M. J., Lansaker P., Conde J. M., Recio M., & Sartori E, Forsmark 1&2 Stability Benchmark. Time series analysis methods for oscillations during BWR operation, Final Report, NEA/NSC/DOC, *Nuclear Energy Agency*, 2002.