

# METODOLOGÍA PARA LA INTEGRACIÓN DE LA SEGURIDAD EN LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE REACTORES AVANZADOS

Grinblat, P.; Schlamp, M.; Brasnarof, D. y Giménez, M.

Centro Atómico Bariloche  
Comisión Nacional de Energía Atómica

gimenez@cab.cnea.gov.ar

## Resumen

En este trabajo se desarrolló e implementó una nueva metodología para tomar en cuenta la seguridad del reactor en un proceso de optimización del diseño, a través de *Mapas de Diseño*. Los mismos conforman una nueva técnica que compara las variables críticas ante la ocurrencia de secuencias accidentales con valores límite determinados por los criterios de diseño. De esta manera se logra un buen balance sin permitir que la búsqueda de una mejor performance económica viole los criterios de seguridad, ni que el hecho de cumplir con dichos criterios implique un costo excesivo que deteriore la competitividad del reactor. Hasta el momento no existía ninguna herramienta de diseño que permitiera realizar esto en forma integrada.

La metodología está plasmada en una **herramienta** que permite llevar a cabo la tarea mencionada, mediante las rutinas desarrolladas con este fin.

## Abstract

In this work a **new methodology** has been developed and implemented for taking into account the safety levels of the reactor in a **design optimization process**, by using *Design Maps*. They represent a new technique for comparing critical variables in case an accidental sequenced happened, with limit values set by the design criteria. So a good **balance** is achieved, without allowing the economic performance search to cause a too risky reactor, and guaranteeing the competitiveness of it in spite of the safety costs. Up to the moment, there is no design tool able to accomplish this task in an integrated way.

A **computational tool** based on this methodology has been implemented. These tool specially programmed routines allow carrying out the mentioned tasks.

## 1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una nueva metodología de diseño de reactores integrados que integre, en un esquema de cálculo y optimización económica, aspectos de seguridad nuclear con el diseño neutrónico, termohidráulico y mecánico.

## 2. Introducción, Marco Previo y Estado del Arte

Las **condiciones actuales de mercado requieren** que la energía eléctrica producida sea **económica y segura**. Para lograr esto se necesita un **buen diseño** conceptual del reactor nuclear, donde es importante realizar un análisis con un enfoque global **contemplando las realimentaciones de diseño** entre los sistemas que lo componen. El diseño de un reactor es una tarea intrínsecamente compleja, dada la cantidad de parámetros a dimensionar, y las relaciones existentes debidas a los complejos acoples entre los mismos.

Al ser tan **complejo el diseño de un reactor**, al problema se lo ataca desde los distintos aspectos del comportamiento del mismo. En la etapa conceptual interesan principalmente, por su influencia en los costos del reactor, la cuantificación de los parámetros mecánicos, termohidráulicos y neutrónicos. **Tradicionalmente** el diseño de todos los sistemas necesarios para el funcionamiento del reactor, se realizaba teniendo en cuenta las interrelaciones principales de los parámetros técnicos, en donde la **cuestión económica** y las variables características de la misma quedaban relevadas a una **segunda revisión**. Los reactores producto de estos diseños funcionaban técnicamente –muchos aún lo siguen haciendo–, pero debido a la manera de encarar el diseño **no se los podía optimizar económicamente**, o bien dicha optimización se realizaba a través de los diferentes diseños sucesivos una vez construidos. Más aún, en muchos casos **la seguridad se evaluaba una vez definido todo el diseño** de los sistemas principales, y para los casos necesarios se le agregaban sistemas de seguridad a modo de “parches”. Si bien dichos reactores cumplían con los requerimientos de diseño relativos a la seguridad, el **desbalance existente** entre la economía y la seguridad del reactor era evidente en muchos de estos casos.

Por lo tanto puede verse la **necesidad** de que en la etapa de diseño conceptual se evalúen los aspectos de **economía** y de **seguridad** en forma **conjunta**, de manera de balancear convenientemente estos dos aspectos fundamentales del diseño. Este balance se logra **realimentando el conjunto de parámetros de diseño**, con los criterios tenidos en cuenta para la seguridad, de manera de obtener un reactor que sea más seguro, sin que su costo crezca deliberadamente.

## 3. Código IREP

Debido a los complejos cálculos y análisis inherentes al diseño y de la mano de la creciente capacidad de cálculo de las computadoras, surgen **herramientas computacionales** que hacen de soporte para el equipo de diseño. Estos programas realizan las iteraciones internas necesarias para obtener un conjunto cerrado de parámetros de diseño que conformen un reactor, que tenga en cuenta los principales acoples existentes. En algunos casos, las aplicaciones permiten también **optimizar económicamente** los parámetros más importantes del diseño del núcleo, primario y secundario, de manera de reducir el costo de generación de la electricidad. Esto es

conveniente realizarlo desde la **etapa conceptual del diseño**, ya que es importante tener el diseño optimizado antes de pasar a la etapa de ingeniería de detalle, por una simple cuestión de costos de ingeniería. Otra de las ventajas importantes de realizar una optimización en la etapa conceptual, reside en que la misma **posibilita visualizar las tendencias** –mediante análisis de sensibilidad– y las **realimentaciones** de diseño que aparecen, otorgando al equipo de diseño más argumentos para tomar decisiones ingenieriles.

Es de particular interés el diseño de los **reactores integrados**, por sus características intrínsecas que lo hacen un reactor económico y seguro, tal como lo muestra la tendencia actual de distintos diseñadores para reactores de pequeña y mediana potencia [1, 2, 3], con el objetivo de satisfacer las demandas del mercado.

Un programa que realiza estas tareas aplicadas al diseño de reactores integrados, evaluando aspectos termohidráulicos, neutrónicos y mecánicos, es el **IREP** (Integrated Reactor Evaluation Program) [4, 5, 6]. Pero **no existe hasta el momento** una herramienta que además de cumplir estas funciones, permita analizar en forma conjunta la **seguridad** de cada diseño desde la etapa de la ingeniería conceptual. Este código, como se menciona más arriba, permite además llevar a cabo una optimización automática de los parámetros más influyentes en el costo de generación de la electricidad generada por el reactor diseñado.

El código IREP dimensiona los parámetros de diseño y costea el reactor en sus rutinas de **cálculo** y **evaluación económica**. La optimización de los parámetros para minimizar el costo de generación, la lleva a cabo con su **rutina de optimización**, de la cual se describe el funcionamiento a continuación (**Figura 1**).

Lo primero que hace el usuario del código es tomar algunas **decisiones de ingeniería**, como ser el tipo de generador de vapor a ser implementado en el diseño (primario por lado tubo o por lado carcasa), si la circulación del circuito primario será natural o será forzada, la potencia térmica de la planta, etcétera. Así se podrán **comparar** los resultados de las **distintas alternativas** consideradas. Basándose en esto, obtiene manualmente un **dimensionamiento inicial del diseño** que, claro está, contiene los parámetros de diseño. Éstos son ingresados en el código, y son la entrada para las rutinas de cálculo; las cuales arrojan como resultados los **parámetros de operación** de la planta en el estacionario, como así también los **costos** de la misma. Estas salidas, junto a algunas restricciones de diseño, ingresan a la rutina de optimización, la cual arroja como resultado un **nuevo conjunto** de parámetros de diseño. Los mismos reingresan a las rutinas de cálculo, y así se obtiene (si la rutina de optimización cumplió su función) un menor costo de generación. Esta secuencia se repite tantas veces como lo desee el usuario para minimizar el costo obtenido.

#### **4. Motivación y Propuesta**

Como ya ha sido mencionado, para que el reactor diseñado penetre en el mercado de la energía eléctrica, el mismo debe generar energía de una manera que sea segura y económica. Por esto **se necesita de un buen diseño desde la etapa conceptual** que evalúe aspectos de **economía y de seguridad en forma conjunta**. Integrando el análisis de la seguridad en la etapa conceptual del diseño, el costo debido a la misma no necesariamente aumenta, como era el caso típico en los diseños clásicos. Con esta nueva metodología, podrá obtenerse un reactor haciendo un buen balance entre los costos de

controlar el riesgo y los beneficios obtenidos por la generación de energía eléctrica segura y económica.

**Lo que se propone es: partir del código IREP, integrarle la capacidad de analizar la seguridad para cada conjunto de parámetros** que definen un posible diseño del reactor durante el proceso de optimización, y **permitir que las variables de la seguridad puedan** –en los casos que sea necesario– **ser tomadas como restricciones en la optimización económica.** Es decir ahora además, aparecen las interacciones de la seguridad con los distintos aspectos tecnológicos y con la economía de la planta [7].

## 5. Mapas de Diseño: Optimización, Observables y Restricciones

Para enfrentar el problema planteado, se comienza viendo que todo proceso de **optimización** siempre tiene un objetivo, una característica para el diseño que se está analizando que se desea alcanzar. Estas características se plasman en variables numéricas, típicamente resultados de los parámetros de diseño, que son testigos de cuán bueno o malo es un diseño en relación al objetivo propuesto. Las mismas son llamadas **figuras de mérito o variables de mérito.**

Para la performance **económica** se puede tomar como **figura de mérito** el costo de la generación eléctrica, tal como lo hacía el código IREP original. Además se implementaron las opciones de minimizar el costo de inversión por unidad de potencia (en \$/kW), el costo de inversión total (en \$) liberando la potencia como un parámetro a optimizar y la de maximizar el valor presente neto del proyecto (suponiendo un precio conocido de venta de la unidad de energía).

Asimismo para evaluar la seguridad del reactor pueden tomarse como **figuras de mérito los observables** en algunos transitorios accidentales. Si bien serán definidos más adelante, un **observable** de seguridad puede interpretarse como una variable que representa el estado de seguridad de la planta, ante un transitorio accidental. Un ejemplo claro de un observable es el tiempo que demora el nivel de agua que está encima del núcleo en bajar hasta descubrir el mismo ante una secuencia accidental de pérdida de refrigerante (LOCA), llamado simplemente tiempo de descubrimiento de núcleo o  $t_{DN}$ . Otro ejemplo sería la presión a la que se encuentra el circuito primario en el momento de descubrirse el núcleo. Otro más podría ser el Minimum Critical Power Ratio alcanzado en alguna secuencia accidental. Es evidente que el valor de cada observable será función de los parámetros de diseño. Estos observables serán utilizados para evaluar el grado de seguridad y determinar hacia dónde deben moverse dichos parámetros dentro del esquema general de optimización.

Por otro lado están las **restricciones**, las cuales son las condiciones que debe cumplir un diseño en particular para que se verifiquen los requerimientos de diseño. Las mismas relacionan el valor de una variable con un valor límite fijado por los requerimientos. En particular para cuantificar la seguridad del reactor el programa toma criterios determinísticos, es decir, los observables que representan a la seguridad de cada diseño son comparados con los valores límites impuestos como criterios de diseño y de esta manera, también, determina hacia dónde deben moverse los valores de los parámetros de diseño. De la misma manera, ahora es también posible tomar como restricción alguno de los costos del reactor, mientras se optimiza para mejorar los límites colocados a las variables representativas de la seguridad.

Teniendo en cuenta entonces que el dimensionamiento de los parámetros de cada diseño en particular influye tanto en la figura de mérito como en las variables limitadas por las restricciones, se llega al concepto de **mapa de diseño**. Los mismos conforman una herramienta útil para verificar el **cumplimiento de las restricciones a largo de la optimización**. Además, permiten que los parámetros de diseño se muevan en su espacio vectorial de manera de mejorar la función de mérito en cuestión, sin violar los criterios de diseño adoptados. Antes de describirlos en detalle se definirán algunos conceptos previos [8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14]:

**Parámetros de Diseño:** Serán en adelante denotados con  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Es el vector que representa a los  $n$  parámetros de diseño utilizados en uno de los pasos del proceso de optimización realizado por la nueva versión del código IREP. Debe tenerse en cuenta que en  $\vec{x}$  pueden estar incluidos los *parámetros de entrada* al código (presión de operación, enriquecimiento, etc.); pero no están incluidos algunos *resultados* del mismo, tales como los caudales, temperaturas o coeficientes de reactividad.

**Observable:** Será genéricamente denotado con la letra  $O$ . El mismo es una variable de funcionamiento del sistema, e indica el nivel de exigencia sobre un determinado sistema o componente de la planta. Se puede decir que un observable es una variable que es *testigo* de la seguridad del reactor, ya que según su valor se puede determinar si el mismo está en condición segura o no. La idea es que para cada transitorio accidental se define uno o más observables que representan a la seguridad del reactor. Se busca entonces seleccionar todos los observables que pueden ser críticos para la seguridad del reactor, tanto en el estacionario como en los transitorios y accidentes postulados.

Como ya ha sido mencionado, **los observables son función del dimensionamiento de los parámetros de diseño**. Esto quiere decir que para un conjunto de parámetros de diseño dado y ante una secuencia accidental también dada, la evolución del sistema estará marcada por aquellos parámetros que influyen en los procesos físicos involucrados.

Una vez definidos estos conceptos previos, se está en condiciones de definir, describir y analizar qué son los mapas de diseño. Los mismos están compuestos por:

1. Una función que relaciona un observable  $O$  con algunos parámetros de diseño comprendidos en  $\vec{x}$  ó bien con alguna combinación de los mismos que será denotada con  $h(\vec{x})$ . La idea es que  $h(\vec{x})$  comprenda sólo algunos parámetros, y probablemente sea función solamente de algunos números adimensionales del sistema, y no de los parámetros de diseño en sí mismos. Cada observable  $O_j$  puede depender de distintas combinaciones de parámetros  $h_j(\vec{x})$ .
2. Un valor límite determinado por el criterio de diseño correspondiente al observable en cuestión. Este valor se fija de manera de no alcanzar condiciones no deseadas como por ejemplo un accidente severo. El criterio podrá escribirse en general de la forma  $O_j \geq l_j$  u  $O_k \leq L_k$ , donde  $l_j$  representa un límite inferior para el observable  $j$ , y  $L_k$  es una cota superior para el observable  $k$ .

Una representación gráfica de un mapa de diseño, tal como ha sido definido, puede apreciarse en la **Figura 2**, donde se observa la **variación del observable en función de los parámetros de diseño**, en color claro. En realidad los parámetros ocuparán tantas dimensiones como la cantidad de aquellos que influyan en el valor del observable en cuestión. El **valor límite**, en tono más oscuro, es una **constante** que no depende del diseño particular, sino que representa al criterio a ser tenido en cuenta para todos los diseños. Supóngase que el observable en cuestión no debe ser menor que cierto valor límite. Entonces, para el mapa de diseño graficado, la región en la que el reactor es realizable sin violar este criterio es la que está a la izquierda de la intersección entre ambas curvas.

La **principal ventaja del método** de los mapas de diseño reside en la **posibilidad de variar conjuntamente los parámetros que influyen tanto en uno o más observables como en la función de mérito, de manera de obtener un mejor diseño manteniendo limitados los valores de los observables**. Por ejemplo, pueden aparecer casos en los que para mantener constante el tiempo de descubrimiento de núcleo ante un LOCA, resulta conveniente reducir el volumen ocupado por el agua del sistema primario aumentando el volumen de líquido en el Sistema de Inyección de Emergencia.

## 6. Rutina de Creación de Mapas de Diseño

Una opción para implementar las restricciones, es la de realizar los mapas *a priori*, antes de efectuar la optimización. Los mismos son realizados con una amplitud y discretización de cada variable definidas por el usuario. La matriz n-dimensional de parámetros se va barriendo y los observables obtenidos para cada punto son almacenados en disco, para luego ser accedidos desde el optimizador como una base de datos. Otra alternativa es ir obteniéndose los valores a medida que se va realizando la optimización, lo que sería un método *online* de cálculo del mapa. En la elección de cuál de las dos alternativas implementadas utilizar para realizar una optimización que contemple las restricciones pertinentes, debe tenerse en cuenta que en ambos casos deberán realizarse varias llamadas a los modelos de cálculo, lo cual puede penalizar en muchos casos el tiempo de cálculo.

Un esquema del **funcionamiento de la rutina de creación de los mapas de diseño** se muestra en la **Figura 3**. En cada paso se obtiene, a medida que se va recorriendo todo el dominio determinado de los parámetros de diseño, el observable que corresponde para el conjunto de parámetros correspondiente.

Los modelos de cálculo de transitorios normalmente necesitan tanto las características geométricas (volumen del recipiente de presión, altura, diámetros, etc.) como los parámetros de operación y condiciones nominales del reactor (presión, potencia, caudales, temperaturas y coeficientes de reactividad). Con parte de estos datos se determinan las condiciones iniciales, y los modelos pueden evaluar los transitorios. Esto hace necesario que antes de entrar a estas rutinas se obtengan algunos de estos parámetros como resultados de las corridas del código IREP, que calcula los parámetros de funcionamiento en el estacionario.

Cada mapa de diseño se obtiene para una secuencia accidental dada, cuyas condiciones son implementadas en el modelo de cálculo de transitorios. Así se obtiene el observable, que junto a los parámetros de diseño va a parar al mapa de diseño. Todo

esto se repite para cada conjunto de parámetros de diseño incluido en el dominio del mapa.

## 7. Optimización utilizando Mapas de Diseño

Una vez obtenidos los mapas de diseño para tomar en cuenta los criterios considerados en la ingeniería del reactor, o bien una vez creados los enlaces a los módulos de cálculo para ir evaluándolos *online*, se procede con la optimización de los parámetros que influyen en la figura de mérito elegida. Para realizar todo esto el código IREP 3 posee una **rutina de optimización** que paso a paso arroja un nuevo conjunto de parámetros con el objetivo de ir mejorando el valor de la figura de mérito obtenida y a la vez cumpliendo con los criterios de diseño relativos a las restricciones de seguridad.

**En cada paso** y en función de los parámetros, el código calcula u obtiene de un mapa de diseño el **valor de la figura de mérito**, que aquí llamamos  $M(\bar{x})$ . Luego evalúa las **derivadas parciales** de  $M$  respecto a cada una de las variables que desean optimizarse automáticamente, y así determina el salto económicamente óptimo en el vector de los parámetros, paralelo al gradiente de la función de mérito [8]:

$$\delta\bar{x}_{\text{mérito}} // \nabla M(\bar{x}) = \left( \frac{\partial M}{\partial x_1}, \frac{\partial M}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial M}{\partial x_n} \right) \quad (1)$$

La constante de proporcionalidad está dada por el valor elegido por el usuario para el salto porcentual entre pasos de la optimización.

Por otro lado están los **mapas de diseño** obtenidos, los cuales contienen **funciones** de la forma  $O_j = f_j(h_j(\bar{x}))$ . Estos **observables** pueden escribirse en general como una función de todos los parámetros de entrada al código IREP que se quieren optimizar,  $O_j = f_j(h_j(\bar{x})) = O_j(\bar{x})$ . En estas ecuaciones,  $j$  varía desde uno hasta el número de observables que interesan considerarse.

Durante el proceso de optimización **el código va encontrando los sucesivos**  $\delta\bar{x}_{\text{mérito}}$  que se dirigen hacia el punto  $\bar{x}$ , en el espacio  $n$ -dimensional de los parámetros de diseño, cuya **función de mérito es óptima**. Se utilizan los **mapas de diseño** para obtener el valor de los **observables en el nuevo punto** de diseño.

A lo largo de este proceso, eventualmente **se irán alcanzando las restricciones** colocadas. En cada paso se pueden encontrar **dos clases** de restricciones que serán descriptas a continuación. Las mismas serán llamadas **restricciones constantes y restricciones nuevas**.

Si en algún paso, al nuevo  $\bar{x} = \bar{x}_{\text{anterior}} + \delta\bar{x}_{\text{mérito}}$  resultan corresponderle **observables** (al menos uno) que **superan** (por exceso o por defecto) los **límites** establecidos para los mismos, habrá que **restringir el salto** a uno más pequeño que, aún yendo hacia un mejor valor de la figura de mérito, **no viole los criterios** establecidos para la seguridad o la economía del reactor. Dado que la dirección de optimización indicaba cruzar estos límites, hecho que se desea impedir, moverse hacia el lado contrario relajando un poco los observables en cuestión iría en detrimento de la figura de mérito. Por lo tanto **la solución es mantener constantes los observables** en el

paso siguiente. En los pasos subsiguientes se irán adhiriendo (o no) a esta técnica de mantenerlos constantes, los otros observables que están limitados. Este es el caso de las **restricciones constantes** anteriormente mencionadas.

En los pasos siguientes, donde **desea mantenerse constantes** a un número no nulo  $K$  de observables, se procede como se describe a continuación. La **invariancia de los observables alcanzados anteriormente** puede escribirse de la siguiente manera:

$$\delta O_j(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial O_j}{\partial x_i} \delta x_i = \delta \vec{x} \cdot \nabla O_j(\vec{x}) = 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

Esto quiere decir que el **vector salto debe ser normal a los gradientes** de cada observable que desea mantenerse fijo. En otras palabras,  $\delta \vec{x}$  debe tener componentes nulas en las direcciones determinadas por los gradientes de los observables. Pero **además se desea que  $\delta \vec{x}$  siga siendo lo más parecido posible** al vector determinado por la búsqueda de una **mejor figura de mérito**. Para esto lo que se hace es construir el subespacio generado por los gradientes de los observables cuyos límites han sido alcanzados, y obtener una base ortonormal del mismo, mediante el proceso de **ortogonalización de Gram-Schmidt**. A continuación se le restan, al vector de salto, las componentes en este subespacio. Los gradientes de los observables se obtienen directamente calculando numéricamente las derivadas en los mapas de diseño.

Una vez ortogonalizado el subespacio de los gradientes de los observables cuyas restricciones fueron alcanzadas anteriormente, pueden restársele al vector  $\delta \vec{x}_{\text{mérito}}$  las proyecciones del mismo sobre cada una de las componentes de la base. En la **Figura 4** se muestra un **esquema de la resta de componentes** realizada, para un ejemplo de  $\delta \vec{x}$  en un espacio tridimensional ortogonalizado. Luego de restadas estas componentes, el **vector de salto queda proyectado** sobre el subespacio de  $n-K$  dimensiones que es ortogonal al que está formado por los gradientes de los observables anteriormente alcanzados.

Supóngase que durante el proceso de la optimización, todavía no se alcanzó el límite fijado para el observable  $O_j$ . En el paso en el cual se supera el mismo, debe truncarse el  $\delta \vec{x}$  a un **vector más corto**<sup>1</sup>,  $\delta \vec{x} \leftarrow \alpha \cdot \delta \vec{x}$ ,  $0 < \alpha < 1$  tal que cumpla que  $O_j(\vec{x}_{\text{paso anterior}} + \delta \vec{x}) = \text{límite}$ . Esto se implementa mediante el método de bisección, hasta hallar un  $\alpha$  para el cual el valor del observable cae dentro de una **ventana de tolerancia** definida por el usuario. Si en un mismo paso se alcanzan los límites para más de un observable, este análisis debe realizarse para todos los observables en cuestión, y elegirse el  $\alpha$  mínimo del conjunto resultante. Este caso corresponde a las **restricciones nuevas** que se mencionan más arriba. En resumen, el funcionamiento de la rutina de optimización puede observarse en la **Figura 5**.

Esta rutina funciona de la misma manera tanto para las optimizaciones realizadas calculando los observables de manera *online* como para aquellas en las que los mismos son obtenidos leyendo los valores de un mapa de diseño –volcado en una base de datos– obtenido *a priori*. Estos **observables deben evaluarse** para el cálculo de

<sup>1</sup> Para no confundirla con la igualdad matemática, se representa la asignación del valor  $B$  a la variable  $A$  mediante la notación utilizada en informática:  $A \leftarrow B$ .



sus gradientes y en la búsqueda del valor de  $\alpha$  en paso. Aquí se puede ver porqué es más rápida una optimización realizada mediante el mapa obtenido *a priori* en aquellos casos en los que el modelo de cálculo es demasiado lento como para poder ser llamado tantas veces en cada paso de la optimización. En esos casos podrá optarse por tener pretabulados los observables en función de los parámetros de diseño en los mapas de diseño. Para los casos en los que la velocidad de ejecución del modelo de cálculo no sea demasiado significativa, no se presenta ningún inconveniente por realizarlo de manera *online*.

Un **esquema** de cómo queda esto **integrado** con las rutinas de cálculo del código IREP 3 puede apreciarse en la **Figura 6**. En la misma se observa en el lazo inferior lo realizado por las versiones previas del código. En toda la parte superior está la verificación del cumplimiento de las restricciones mediante los mapas de diseño, junto a la nueva rutina de optimización que ha sido implementado en el IREP 3.

## 8. Conclusiones

Se desarrolló una **metodología** para integrar el análisis de la seguridad con los cálculos neutrónicos, termohidráulicos y mecánicos, en la optimización del diseño de reactores, basada en los mapas de diseño. Se implementó una **herramienta** que permite aplicar esta nueva técnica al diseño de los reactores integrados.

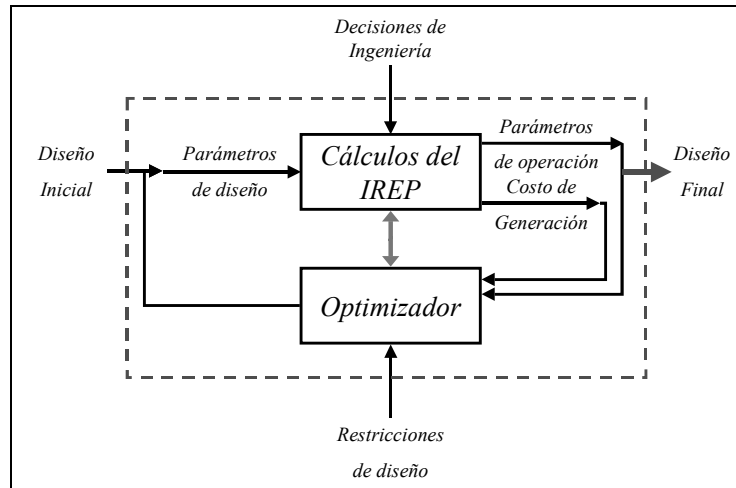
El programa cuenta con los instrumentos necesarios para poder garantizar que los **criterios de seguridad adoptados se verifican** en cada iteración de la optimización. Los observables de seguridad pueden ser evaluados *a priori* y volcados en un mapa de diseño, o bien pueden ir evaluándose *online*, a medida que se va realizando la optimización. En los casos en los que la búsqueda de una mejor figura de mérito indique un vector de salto –de los parámetros de diseño– que implique que algún observable viole su límite, **el vector es modificado** para evitar esto.

La metodología desarrollada, además, brinda la posibilidad de manejar **límites probabilísticos** para evitar la ocurrencia de eventos no deseados, como ser la probabilidad de fusión de núcleo.

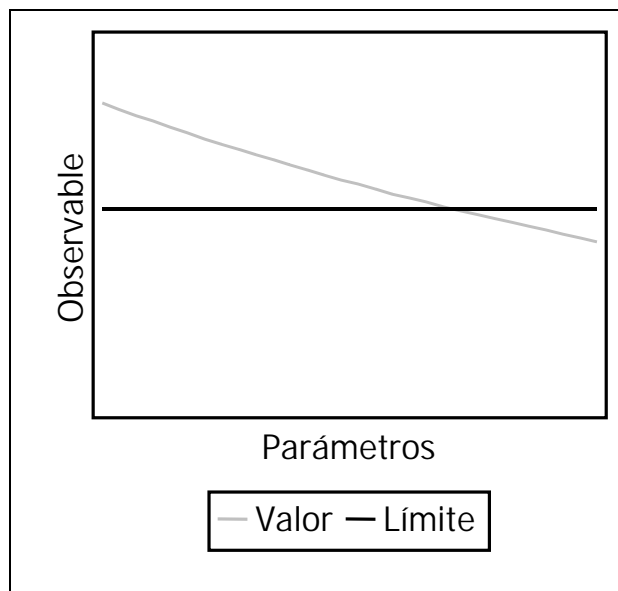
## 9. Referencias

- [1] **Carelli, M. D. et al:** “*Safety by Design: A New Approach to Accident Management in the IRIS Reactor*”. International Seminar on Status and Prospects for Small and Medium Sized Reactors. Cairo, Egypt, May 2001
- [2] **Chang, M. H.; Yeo, J. W.:** “*Advanced Design Features Adopted in SMART*”. International Seminar on Status and Prospects for Small and Medium Sized Reactors. Cairo, Egypt, May 2001
- [3] **Ishida, T.; Kusunoki, N. Odano, N.; Nakajima, N. and Ochiai, M.:** “*Design of Passively Safe Small Reactor for Distributed Energy System and Technology Development*”. International Seminar on Status and Prospects for Small and Medium Sized Reactors. Cairo, Egypt, May 2001
- [4] Este código ha sido desarrollado íntegramente en el marco de trabajos de graduación de alumnos de Ingeniería Nuclear en el Instituto Balseiro, y en su primera versión ha sido transferido a la IAEA
- [5] **Rubiolo, Pablo R.:** “*Diseño Conceptual del CAREM-Plus*”. Trabajo Especial de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Junio de 1996
- [6] **Kyung, Kyu H.:** “*Diseño Conceptual de DuCom un nuevo concepto de centrales híbridas gas-nuclear de ciclo dual-combinado*”. Trabajo Especial de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Junio de 2000
- [7] **Grinblat, Pablo:** “*Metodología para la Integración de la Seguridad en la Optimización del Diseño de Reactores Avanzados*”. Trabajo Especial de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Junio de 2001
- [8] **Arora, Jasbir S.:** “*Introduction to Optimum Design*”. McGraw-Hill, 1989
- [9] **Dieter, George E.:** “*Engineering Design: A Materials and Processing Approach*”. McGraw-Hill, 1989
- [10] **Zanocco, Pablo:** “*Criterios de Diseño de Reactores Integrados Basados en Transitorios*”. Trabajo Especial de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Junio de 1998
- [11] **Zanocco, P.; Giménez, M. y Delmastro, D.:** “*Estudio de Transitorios Previstos sin Scram como Soporte al Diseño de Reactores Integrados*”. Trabajo presentado en AATN 1999.
- [12] **Zanocco, P.; Giménez, M. y Delmastro, D.:** “*Mapas de diseño: Una técnica útil en la evaluación de la seguridad para el diseño de reactores integrados. Aplicación a transitorios de pérdida de fuente fría*”. Trabajo presentado en AATN 1998.
- [13] **Zanocco, P.; Giménez, M. y Delmastro, D.:** “*Integrated Reactors Design Criterion based on Transients*”. VII Congresso Geral de Energía Nuclear, Bello Horizonte, Brasil, 1999
- [14] **Estévez, Esteban:** “*Protecciones Alternativas para Accidentes con Pérdida de Refrigerante*”. Trabajo Especial de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Junio de 1997

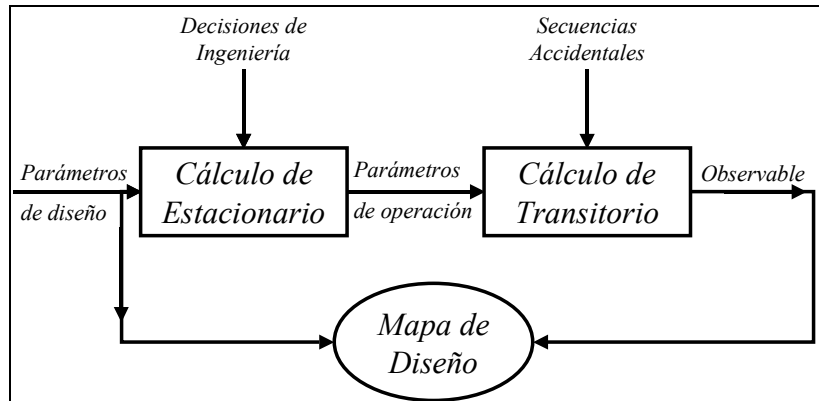
## 10. Figuras



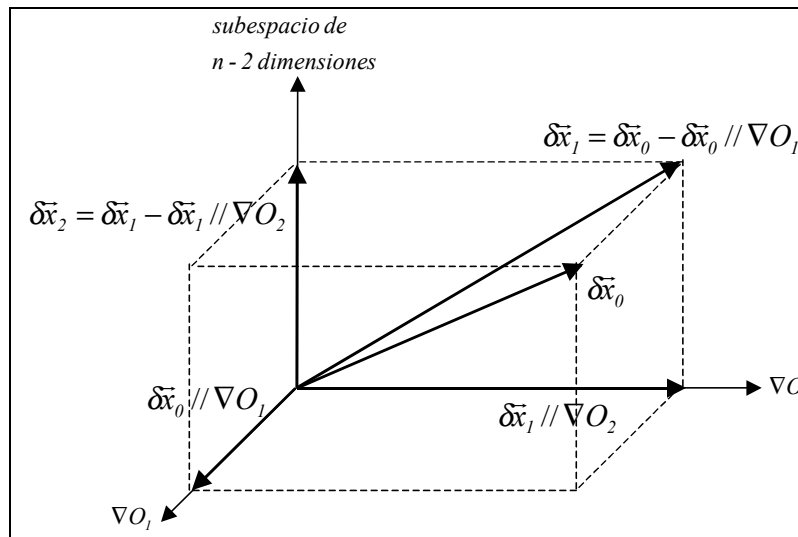
**Figura 1:** Funcionamiento del proceso de optimización del código IREP.



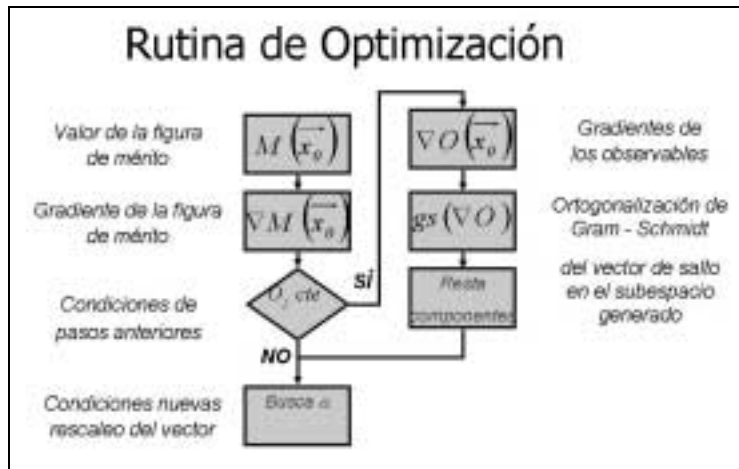
**Figura 2:** Mapa de diseño típico. El conjunto de los parámetros de diseño es en general n-dimensional. En color gris está marcado el valor del observable en función de los mismos. En color negro está marcado el valor límite para el observable. El mismo es una constante que no depende de los valores que toman los parámetros de diseño.



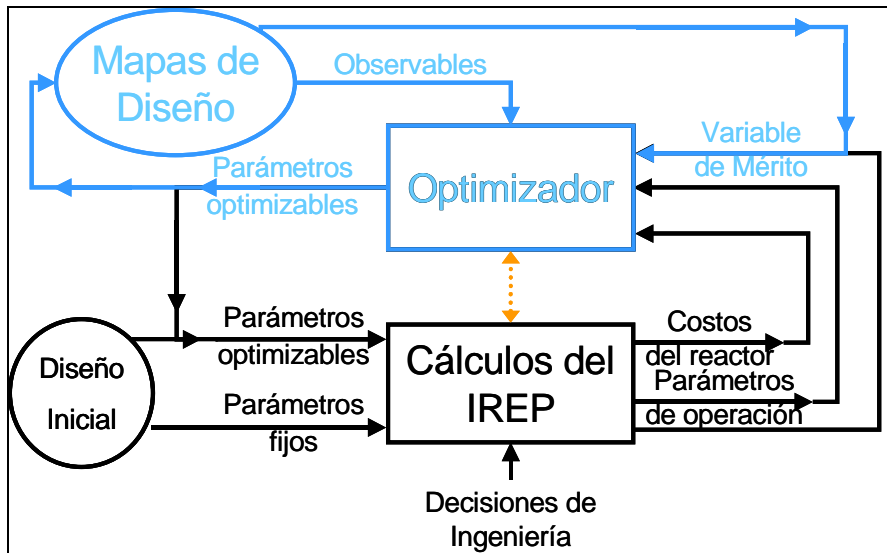
**Figura 3:** Esquema del método para obtener cada punto en un mapa de diseño.



**Figura 4:** Al vector de salto,  $\delta\vec{x}_0$ , se le quitan las componentes en las direcciones de los gradientes de los observables que no desean modificarse. Se denota por  $\delta\vec{x} // \nabla O$  a la proyección vectorial de  $\delta\vec{x}$  en la dirección de  $\nabla O$ . En este gráfico,  $\nabla O_1$  y  $\nabla O_2$  son las componentes de la base ya ortogonalizada del subespacio en cuestión.



**Figura 5:** Diagrama de flujo de la nueva rutina de optimización. Dado un diseño inicial con vector  $\vec{x}_0$  en el espacio de diseño, se realizan todos los cálculos para obtener el vector de salto que permita mejorar la variable de mérito cumpliendo con las restricciones impuestas. Al sumarle al vector inicial este salto, se obtiene un nuevo vector  $\vec{x}$  con el cual se recalcula la variable de mérito y se repite la rutina, hasta converger a un valor óptimo.



**Figura 6:** Esquema de cómo queda integrado el código IREP 3. Todo el lazo inferior es básicamente el que realizaba inicialmente el código IREP 2. Las modificaciones introducidas incluyen una nueva rutina de optimización, la utilización de los mapas de diseño como bases de datos para obtener observables y variables de mérito (antes la única era el TUEC), y la eventual eliminación de las llamadas del optimizador a las rutinas de cálculo del código IREP.