



MX0500288

XVI Congreso Anual de la SNM y XXIII Reunión Anual de la SMSR  
Oaxaca, Oaxaca, México, Julio 10-13, 2005

---

## Diseño Conceptual de un Simulador de Núcleo eléctrica con Reactor PBMR basado en Modelos de Orden Reducido

---

*Julio Valle Hernández, Jaime B. Morales S. (Asesor)*  
*Universidad Nacional Autónoma de México*  
*Laboratorio de Análisis de Ingeniería de Reactores Nucleares*  
*DEPFI, Campus Morelos, en IMTA Jiutepec Morelos*  
[jms0620@yahoo.com](mailto:jms0620@yahoo.com)  
[julfi\\_jg@yahoo.com.mx](mailto:julfi_jg@yahoo.com.mx)

### **Resumen**

Este proyecto tiene como finalidad conocer a profundidad el funcionamiento de una nucleoelectrica tipo PBMR (por sus siglas en inglés), el cual tiene un reactor de cama de esferas de grafito y combustible de dióxido de Uranio enfriado con Helio y ciclo termodinámico de Brayton. El simulador pretende describir la dinámica del proceso de generación de energía en el combustible nuclear, el proceso de transporte hacia el refrigerante y la conversión a energía mecánica en los turbo-generadores así como en los intercambiadores de calor indispensables para el proceso. La dinámica de recarga de los elementos combustibles no es modelado en detalle pero sus efectos se representan en los parámetros del modelo. Se modelan también los turbo-compresores del circuito primario del fluido de trabajo. El control de la potencia del reactor nuclear es modelado por medio de funciones de reactividad especificadas en la plataforma de simulación. Los modelos matemáticos propuestos se instalaran en la plataforma de simulación de Simulink-MatLab. Los paneles de control propuestos para este simulador se pueden diseñar e implementar utilizando la caja de herramientas de Simulink que facilita este proceso. El trabajo presenta los modelos matemáticos más importantes utilizados para su futura implementación en Simulink.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. La Planta Nuclear PBMR**

El Reactor Modular de Lecho Fluido (Pebble Bed Modular Reactor - PBMR) es un nuevo tipo de reactor de alta temperatura enfriado con helio, que avanza en la experiencia mundial de los operadores nucleares sobre diseños de reactores más antiguos. Algunas organizaciones aseguran que el PBMR es más seguro, más ecológico, más reducido y económicamente más accesible que los reactores de las plantas nucleares convencionales [1]. La característica más notable de estos reactores es que usan atributos inherentes y naturales, en los procesos de la generación de energía nuclear lo que los hace "a prueba de fugas" y "de máxima seguridad".

Al igual que los reactores convencionales, el PBMR genera energía utilizando el calor de una reacción nuclear en cadena para impulsar una turbina generadora de electricidad. La principal diferencia entre estos dos sistemas radica en el almacenamiento del combustible, uranio enriquecido, y en la transmisión del calor a la planta central. En lugar de las barras de uranio tradicionales, el reactor PBMR está lleno de esferas de grafito del tamaño de una pelota de tenis, cada una de las cuales contiene miles de diminutas partículas de dióxido de uranio. Y

para impulsar las turbinas, en lugar del tradicional vapor, el sistema del PBMR utiliza helio supercalentado.

El sistema de almacenamiento de combustible del PBMR lo hace inherentemente seguro, ya que impide que el material radioactivo se sobrecaliente al punto de llegar a una fuga. "Con un reactor convencional, uno tiene que hacer muchísimas cosas para impedir que la reacción en cadena se salga de control", señalan sus diseñadores. "En un PBMR, por el contrario uno debe hacer diversas maniobras para evitar que la reacción en cadena se detenga". Cuando se produce una falla, el reactor simplemente deja de funcionar. El calor se disipa, y la radioactividad queda en su interior.

Los PBMR's están diseñados para producir 110 MWe cada uno, lo que significa que 30.000 hogares pueden ser abastecidas por un solo reactor. Más de un PBMR se puede ubicar en cada instalación para crear parques de energía. Es posible para cada parque contener hasta 10 módulos que comparten un mismo centro de control. El sistema permite la construcción secuencial de módulos para satisfacer los crecientes requerimientos de energía de cada usuario; a medida de que el área crece, más módulos se pueden añadir para satisfacer las necesidades de energía de la región.

## **1.2. Objetivo del Simulador PBMR**

En muchos procesos reales frecuentemente es necesario simular, es decir, reproducir artificialmente un fenómeno a las relaciones entrada-salida de un sistema. Esto ocurre siempre que la operación de un sistema o la experimentación en él son imposibles, costosas, peligrosas o poco prácticas; como ocurre en el entrenamiento de personal de operación de una planta nuclear.

En la actualidad existen gran variedad de simuladores pero la mayoría de ellos son códigos numéricos difíciles de interpretar y que sólo gente altamente especializada en el tema puede entender, mientras que otros tantos sirven para la capacitación y entrenamiento del personal que labora en áreas afines, y el acceso a ellos o a su información es limitado para los estudiantes de ingeniería y postgrado. En la UNAM no se cuenta con ningún simulador que permita conocer y adiestrar a estudiantes ó ingenieros en la operación de una central de potencia que funcione con un reactor de cama de esferas (PBMR) como el que se desea construir y operar en varias partes del mundo [2].

Por esta razón se desea diseñar un simulador que funcione en una PC común y que permita conocer el funcionamiento y la operación, en tiempo real, de este tipo de reactores.

## **2. PLANTEAMIENTO GENERAL**

El simulador del Reactor Modular de Cama de Esferas (PBMR), es un desarrollo que propone un esquema de construcción de aplicaciones enfocadas al entrenamiento inicial y la docencia, que permitan la interacción de modelos matemáticos de orden reducido, mas no de orden simple, e interfaces gráficas. Este tipo de proyectos pretende ser un precursor de desarrollos tanto de estudiantes como de diversos profesionales, con el interés de mejorar y detallar los sistemas propuestos y generar nuevos.

### 3. ESPECIFICACIONES GENERALES

El desarrollo de este proyecto está acotado por las siguientes especificaciones de diseño:

- Basado en Modelos de Orden Reducido. Se utilizarán modelos matemáticos calculados a partir del comportamiento dinámico de los distintos sistemas físicos y térmicos que participan en la central nuclear PBMR.
- Modelado de una núcleo eléctrica tipo PBMR genérica sin referencia específica a central alguna.
- Implementación del simulador sobre plataforma Windows, modelado matemático en Matlab 7.0. y simulación en Simulink.
- Interfaz gráfica de usuario.
- Inicialización con estados estacionarios previamente verificados en forma cualitativa.
- Control y Monitoreo de simulaciones con gráficos predeterminados.

### 4. METODOLOGÍA

El método que se eligió para desarrollar el simulador es el de modelar matemáticamente todos los dispositivos presentes en una planta real, para que reaccionen a diversas señales, y presenten respuestas que a su vez puedan ser las entradas de otros modelos, y de esta manera presentar las respuestas de cada modelo de acuerdo a las condiciones de la planta en cada paso continuo de simulación, como si se hiciera en un dispositivo real.

Este método de simulación proporciona ventajas respecto a otros debido a que las respuestas pueden observarse en tiempo real de manera continua. Los parámetros pueden alterarse en diferentes cantidades y el sistema reaccionara dinámicamente de acuerdo a las características modificadas, por lo que no existen respuestas predeterminadas y las señales responden mejor a la realidad. Este método otorga también el control que un operador necesita para llevar a cabo un entrenamiento fiable, ya que las situaciones que se presenta en una planta real, distan mucho de ser situaciones predeterminadas, por lo que el operador debe reaccionar ante cualquier situación.

A continuación se describe en resumen el método a seguir a lo largo del desarrollo del simulador PBMR:

- 1) Modelado Matemático. Empleando un análisis del comportamiento físico dinámico, así como de las características propias de los dispositivos, se aplicaran las principales leyes físicas y de ingeniería para obtener modelos matemáticos que representen los comportamientos esenciales que se observan en el reactor nuclear de una central núcleo-eléctrica tipo PBMR en periodos de operación de estado estable.
- 2) Programación de los modelos matemáticos. Una vez que se tiene la formulación matemática de los distintos componentes del sistema, se procederá a su representación en Matlab para verificar si el comportamiento dinámico de las diferentes ecuaciones es el esperado.
- 3) Modularización. Los modelos simulados de los componentes se conectan en módulos para verificar que el comportamiento del módulo integrado es el esperado o si fuera

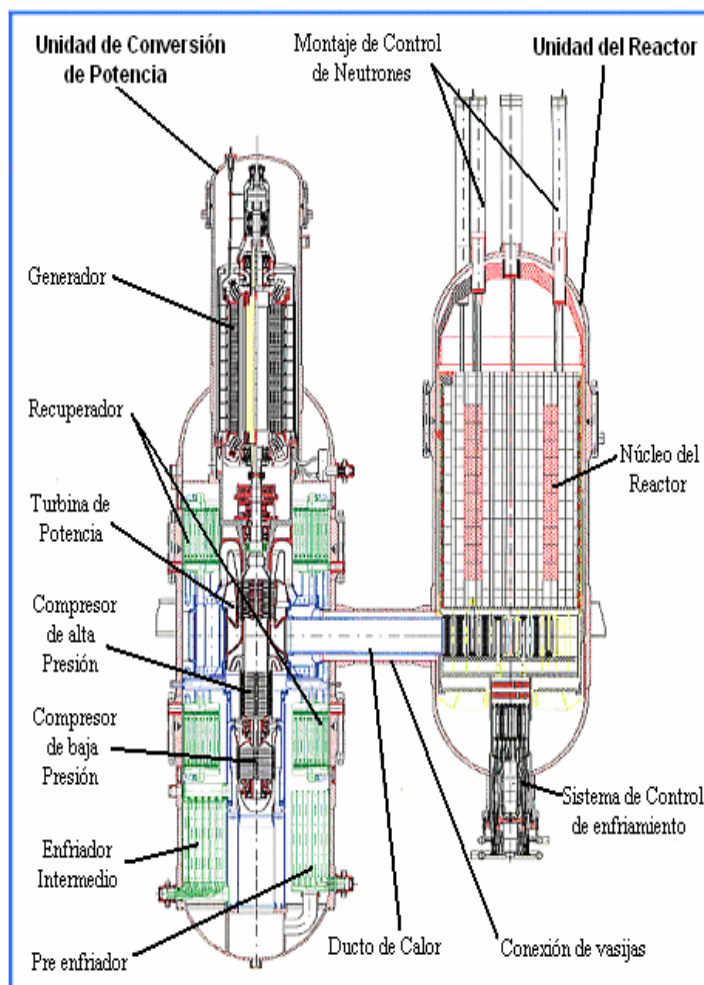
necesario ajustarlo. Procedimiento que se lleva a cabo hasta lograr un modelo integrado satisfactorio.

- 4) Acople de módulos de simulación nuclear. Los distintos módulos se conectan entre sí como un sistema y se verifica que su funcionalidad sea la correcta.
- 5) Diseño de Interfaces. Las Interfases Gráficas de Usuario se diseñarán de manera que la interacción con las variables físicas medibles y/o controlables sea sencilla e intuitiva.

## 5. PRINCIPALES MODULOS DEL REACTOR A SIMULAR.

### 5.1 El Sistema Central de Potencia.

El Sistema Central de Potencia (Main Power System, MPS) de la planta de generación PBMR está integrado por dos unidades principales: la Unidad del Reactor, donde la energía térmica es generada por una reacción nuclear, y la Unidad de Conversión de Potencia, donde la energía térmica es convertida en trabajo mecánico y después en energía eléctrica por medio de un ciclo termodinámico y un turbogenerador.



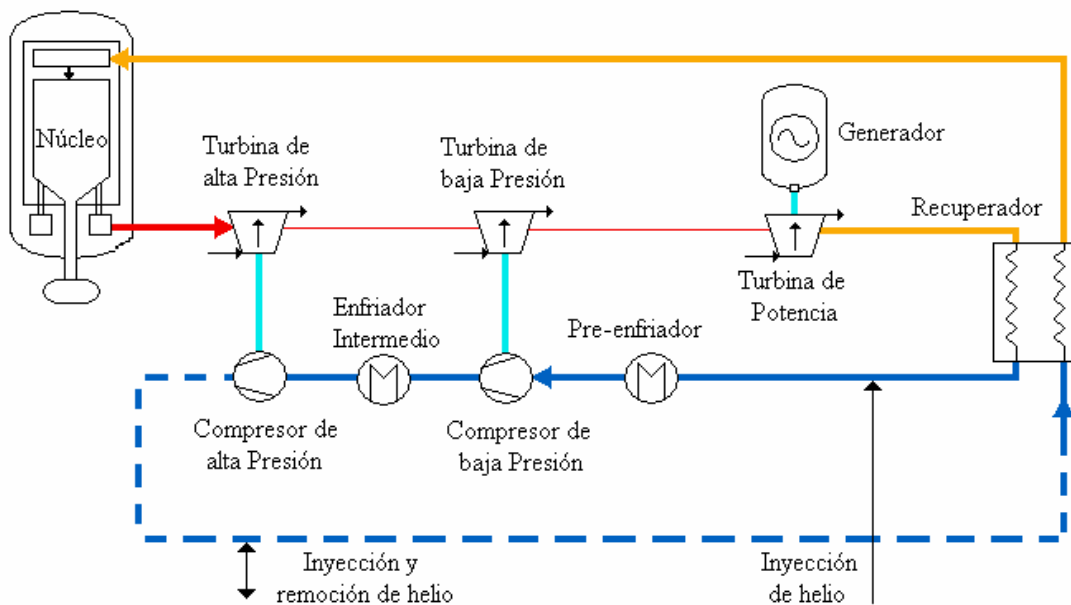
**Figura 1. Sistema Central de Potencia**

### 5.1.1. La Unidad del Reactor

La unidad del Reactor consiste de una vasija de presión vertical de acero. Las esferas de combustible se alojan dentro de una estructura de bloques de grafito, que reflejan a los neutrones de regreso al combustible y que actúa además como un medio pasivo de transferencia de calor. Cuenta con barras de control para la absorción de neutrones y éstas pueden ser introducidas o retiradas de la estructura reflectora de bloques de grafito para controlar la reactividad y la generación de potencia. El reflector de grafito encierra al núcleo, que es la región del reactor donde tiene lugar la reacción nuclear. A carga plena, el reactor contendrá 456,000 esferas de combustible, la geometría de la región de combustible es anular y está localizada alrededor de una columna central de grafito, que sirve como reflector central. El helio fluye a través de la cama de esferas de combustible, removiendo el calor generado por la reacción nuclear, en dirección hacia la Unidad de Conversión de Potencia en donde actuará como fluido de trabajo, de aquí que se utilice un ciclo de gas cerrado.

### 5.1.2 La Unidad de Conversión de Potencia.

La Unidad de Conversión de Potencia basa su funcionamiento en el ciclo termodinámico Brayton (turbina de gas), en el proceso de operación que se describe en la Figura 2:



**Figura 2: Ciclo de operación del PBMR**

El refrigerante, helio, entra al reactor a una temperatura de 500 °C y a una presión de 8.4 MPa, aproximadamente, desciende entre las esferas de combustible removiendo el calor generado durante la reacción nuclear. Posteriormente el helio sale del reactor a una temperatura de 900° C aproximadamente.

- El helio es expandido en la Turbina de Alta Presión, que forma parte de la Unidad Turbo de Alta Presión y que a su vez mueve al Compresor de Alta Presión.

- Enseguida el helio fluye a través de la Turbina de Baja Presión la cual es parte de la Unidad Turbo de Baja Presión que mueve al Compresor de Baja Presión.
- El helio continúa su flujo hasta expandirse en la Turbina de Potencia, proporcionando la potencia mecánica necesaria para accionar el Generador eléctrico.
- En este punto, el helio aún se mantiene a una temperatura elevada. Fluye a través del lado primario del Recuperador donde transfiere calor al gas de baja temperatura que va regresando al reactor.
- El helio que ha pasado por el lado primario del recuperador es enfriado por medio de un Pre-enfriador. Esto aumenta la densidad del helio y mejora la eficiencia del compresor.
- El helio es entonces comprimido por el Compresor de Baja Presión.
- El helio es ahora enfriado en el Enfriador Intermedio (Intercooler). Este proceso nuevamente aumenta la densidad y mejora la eficiencia del compresor.
- El Compresor de Alta Presión comprime el helio hasta 8.5 MPa.
- El ahora vapor de helio, relativamente frío y a alta presión, fluye a través del Recuperador donde es precalentado antes de regresar al reactor.

## 6. MODELOS DEL PBMR

### 6.1. Unidad del Reactor



**Figura 3: Diagrama de bloques de la Unidad del Reactor**

#### 6.1.1. Cinética del reactor

Al fisionarse el núcleo de Uranio se produce una expulsión de neutrones los cuales liberan a otros neutrones y éstos a su vez a otros dando lugar a una reacción en cadena que libera gran cantidad de energía calorífica. Estos neutrones pueden ser inmediatos  $(1-\beta)$  o retardados  $(\beta)$ , y las ecuaciones que representan su comportamiento (aumento de su población) son las ecuaciones de la cinética del Reactor.

Las ecuaciones de cinética puntual con una fuente de neutrones de intensidad  $S_0$  están dadas por:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(r-1) * \beta}{\Lambda} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i + S_0$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i c_i$$

Siendo  $r$  la reactividad en dólares,  $n$  la población de neutrones,  $C_i$  la concentración de precursores de neutrones retardados del grupo  $i$  los cuales están caracterizados por la constante de decaimiento  $\lambda_i$  y la fracción  $\beta_i$ .  $\Lambda$  es el tiempo generacional de los neutrones.

Dividiendo la primera entre  $n_0 = \lambda_i \Lambda c_{i0} / \beta_i$  y considerando  $n/n_0 = N$ ,  $\lambda = \beta / \Lambda$ ,  $\gamma_i = \beta_i / \beta$  y  $c_i/c_{i0} = C_i$  mientras que  $S'_0 = S_0 / n_0$ , resultan ecuaciones normalizadas:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \lambda \left[ (r-1)N + \sum_{i=1}^6 \gamma_i C_i \right] + S'_0 \\ \frac{dC_i}{dt} &= \lambda_i [N - C_i] \end{aligned} \quad (1)$$

En el plano  $s$  las transformadas de Laplace resultan ser:

$$\begin{aligned} C_i(s) &= \frac{\lambda_i N(s) + c_i(0)}{s + \lambda_i} \\ N(s) &= \frac{n(0) + \lambda \sum_{i=1}^6 \gamma_i \frac{c_i(0)}{s + \lambda_i} + \frac{S'_0}{s}}{s - (r-1)\lambda - \lambda \sum_{i=1}^6 \gamma_i \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}} \end{aligned} \quad (2)$$

El polinomio que resulta en el denominador de la función de transferencia pulso es conocido como la ecuación de “inhour” y sus raíces determinan el comportamiento del sistema. Suponiendo que la reactividad permanece constante podemos calcular dichas raíces de la ecuación y se puede concluir que:

- Una raíz estará en  $s = 0$  si la reactividad es  $r=0$  y el reactor está en estado crítico.
- El sistema es inestable por tener una raíz positiva si  $r > 0$  y el reactor está en estado supercrítico.
- El sistema es estable por tener todas las raíces negativas si  $r < 0$  y el reactor está en estado subcrítico.
- Cuando  $s$  pasa por  $-\lambda_i$   $P(s)$  se hace infinito y el lugar geométrico cambia de signo,
- por ello se tienen siete regiones donde  $P(s)$  es finito dando lugar a siete posibles raíces  $\{s_k\}_{k=1}^7$ .

Para obtener la matriz de transición suponemos que durante el paso de integración la reactividad del reactor se mantiene constante (menores que decenas de milisegundo). Rescribiendo la función de transición en términos de las raíces del polinomio característico, observemos que para tener un polinomio de séptimo orden en el primer miembro de la ecuación (2) debemos multiplicar ambos por  $\prod_{i=1}^6 (s + \lambda_i)$  de manera que se podrá expandir en fracciones parciales:

$$N(s) = \sum_{k=1}^7 \frac{A_k}{(s - s_k)} \quad (3)$$

Siendo:

$$A_j = \frac{n(0) + \lambda \sum_{i=1}^6 \gamma_i \frac{c_i(0)}{s_j + \lambda_i} + \frac{S'_0}{s_j}}{\prod_{k \neq j}^7 (s_j - s_k)} \prod_{i=1}^6 (s_j + \lambda_i)$$

Consecuentemente la evolución de la población neutrónica será dada por:

$$n(t) = \sum_{k=1}^7 A_k e^{s_k t}$$

Para los precursores de neutrones retardados la solución puede obtenerse de:

$$C_i(s) = \sum_{k=1}^7 \left( \frac{B_{ik}}{s - s_k} \right) + \frac{c_i(0)}{s + \lambda_i} \tag{4}$$

Siendo:

$$B_{ik} = \frac{\lambda_i}{s_k + \lambda_i} \frac{n(0) + \lambda \sum_{j=1}^6 \gamma_j \frac{c_j(0)}{s_k + \lambda_j} + \frac{S'_0}{s_k}}{\prod_{j \neq k} (s_k - s_j)} \prod_{j=1}^6 (s_k + \lambda_j)$$

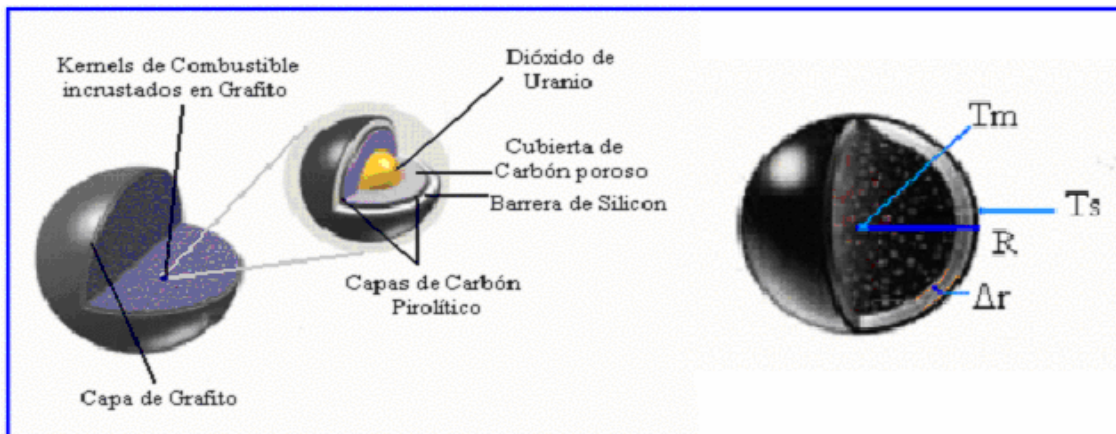
Obsérvese que el sistema no tiene más polos que las raíces de la ecuación de “inhour” por lo tanto en la expansión solo se consideran los términos correspondientes. Finalmente la ecuación que describe el comportamiento temporal de los precursores de neutrones retardados queda como:

$$c_i(t) = \sum_{k=1}^7 B_{ik} e^{s_k t} + c_i(0) e^{-\lambda_i t}$$

La ventaja de este método de solución es que se incluyen todos los precursores de neutrones retardados y mientras no varíe la reactividad se tendrá la solución analítica correcta independientemente del valor de la reactividad.

### 6.1.2 Transferencia de calor

El modelado de la transferencia de calor en el reactor, se realiza a partir de una esfera promedio de combustible, ya que nuestros modelos se plantean de orden reducido.



**Figura 4: Esfera Promedio de Combustible**



Las esferas de combustible se alojan dentro de una estructura de bloques de grafito, que reflejan a los neutrones de regreso al combustible y que actúa además como un medio pasivo de transferencia de calor. El reflector de grafito encierra al núcleo, que es la región del reactor donde tiene lugar la reacción nuclear. A carga plena, el reactor contendrá 456,000 esferas de combustible, la geometría de la región de combustible es anular y está localizada alrededor de una columna central de grafito, que sirve como reflector central.

Un modelo para la transferencia de calor en una esfera promedio de combustibles con radio R, como la que se muestra en la Figura 4, considerando una fuente de calor volumétrico uniforme  $q'$ , cumple con la ecuación de Poisson unidimensional, y está representado en coordenadas polares por la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q'}{k_f} = 0 \quad (1)$$

Integrando esta ecuación para las condiciones de frontera T(r) en r se tiene:

$$T(r) = T_m - \frac{q' r^2}{6k_f} \text{ de donde: } T_m - T_s = \frac{q' R^2}{6k_f} \text{ con } T=T_s \text{ en } r = R, \text{ y } T = T_m \text{ en } r = 0.$$

Despejando  $q'$  y sustituyéndola en la ecuación para el calor total generado en una esfera  $q_s$ , que está dado por la ecuación  $q_s = 3/4(\pi R^3 q')$ , se tiene:

$$q_s = 8\pi R k_f (T_m - T_s) \quad (2)$$

Finalmente considerando el área periférica total de la esfera de combustible  $A_s = 4\pi R^2$ , y reordenando en (2) tenemos:

$$q_s = 2k_f A_s \frac{T_m - T_s}{R}$$

Donde:  $k_f$  = Conductividad del Grafito  
 R = Radio de la Esfera de Combustible  
 T<sub>m</sub> = Temperatura en el Centro de la Esfera  
 T<sub>s</sub> = Temperatura en la Pared de la Esfera

La fuente uniforme de calor volumétrico  $q'$  proviene de la reacción en cadena de los neutrones, y cuyo resultado se obtuvo con las ecuaciones de la cinética del reactor.

### 6.1.3 Remoción de calor

El refrigerante, helio, entra al reactor a una temperatura de 500 °C y a una presión de 8.4 MPa, aproximadamente, desciende entre las esferas de combustible removiendo el calor generado durante la reacción nuclear. Posteriormente el helio sale del reactor a una temperatura de 900° C aproximadamente en dirección hacia la Unidad de Conversión de Potencia en donde actuará como fluido de trabajo.

El calor transferido,  $q_s$  (Btu/hr), de las esferas de combustible al refrigerante Helio está dado por la ley de Newton de refrigeración:

$$q_s = hA(T_s - T_f) \quad (1)$$

Donde:

A = Área por la que cruzan los flujos de calor.  
 h = Coeficiente de transferencia de calor por convección o conductancia térmica.

$T_s$  = Temperatura de la pared de la Esfera de Combustible.

$T_f$  = Temperatura promedio del Fluido Refrigerante, Helio.

Para grandes cantidades de calor es necesario un buen coeficiente de transferencia para remover el calor del reactor, usualmente el gas refrigerante se empuja hacia el canal de combustible a muy grandes velocidades. Estas velocidades pueden ser de una fracción de la velocidad del sonido a la presión y temperatura del gas. En otras palabras el número Mach (la proporción de la velocidad del gas a la velocidad del sonido en él) puede ser del orden de 0.2 o más. La velocidad sónica ( $\alpha$ ) y el número Mach ( $M$ ) están dados por las siguientes ecuaciones para el gas ideal:

$$\alpha = \sqrt{\gamma R g_c T_f} \quad M = \frac{V}{\alpha} = \frac{V}{\sqrt{\gamma R g_c T_f}} \quad (2)$$

donde:  $\gamma$  = Proporción de Calor específico del Gas

$R$  = Constante específica del Gas (constante universal / masa molecular del Gas)

$g_c$  = Factor de Conversión,  $4.17 \times 10^8$  ft lb<sub>m</sub>/ lb<sub>f</sub> hr<sup>2</sup>

$T_f$  = Temperatura promedio del Fluido Refrigerante, en escala absoluta.

$V$  = Mayor Velocidad del flujo de Gas

Cuando la mayor parte del gas en el canal fluye a una gran velocidad axial, ésta tendrá un gradiente de velocidad en directa proporción. Este gradiente de velocidad tiene como resultado la disipación dentro del gas de la energía cinética de las moléculas cercanas a la pared, producto de las fuerzas de ruptura. Este trabajo de ruptura provoca elevación en la temperatura (aparte de los efectos de transferencia de calor). El aumento en la temperatura del gas por este mecanismo natural afecta el coeficiente de transferencia de calor.

La máxima temperatura teórica que puede ser alcanzada en las paredes es la temperatura de estancamiento o temperatura total  $T_{fs}$  y puede ser calculada por la ecuación general de la energía. Considerando que no hay cambio de energía potencial, no se realiza trabajo, ni se transfiere calor la ecuación general de la energía queda de la siguiente forma:  $h_{fs} = h_f + (KF)_f$  donde  $h$  es la entalpía del gas,  $KF$  es la energía cinética y el subíndice  $fs$  y  $f$  se refieren al estancamiento o flujo libre, respectivamente. Para un gas ideal como el Helio la ecuación queda como:

$$T_{fs} = T_f + \frac{V^2}{2g_c J c_p} \quad (3)$$

donde  $c_p$  = Calor Especifico a presión constante del gas

$J$  = Factor de Conversión de Energía = 778 ft lb<sub>f</sub>/ Btu

Usando la relación de gas ideal:

$$c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{R}{J} \quad (4)$$

y combinando las ecuaciones (2) y (4) y reagrupando nos queda:

$$T_{fs} = T_f + \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right) \quad (5)$$

Por lo que finalmente el flujo de calor del Helio que entra a la Unidad de Conversión de Potencia está dado por:

$$q'_s = \frac{q_s}{A} = h(T_s - T_{fs})$$

## 6.2. Unidad de conversión de Potencia



**Figura: 6 Diagrama de Bloques de la Unidad de Conversión de Potencia**

### 6.2.1 Unidad turbo de alta presión.

La Unidad Turbo de Alta Presión está formada por la Turbina de Alta Presión donde es expandido el Helio y por el Compresor de Alta Presión que es movido por esta turbina.

#### a) Ecuaciones de la Turbina de Alta Presión

A partir de la ecuación de los gases ideales se tiene que la presión ( $P_{SR}$ ) con que sale el refrigerante (Helio) de la Unidad del Reactor está dada por la expresión:

$$P_{SR} = R_g T_{fs} \rho_g \quad (1)$$

donde:  $R_g$  = Constante Universal de los Gases

$T_{fs}$  = Temperatura alcanzada por el Helio en la remoción de calor

$\rho_g$  = Densidad Específica del Helio

#### a.1) Temperatura del Helio a la salida de la turbina ( $T_{STap}$ ).

Para el cálculo de la temperatura del gas refrigerante (Helio) a la salida de la Turbina se considera que el proceso de expansión en ésta es adiabático y reversible, además de ser el Helio un gas ideal, por consiguiente la presión y la temperatura del gas a la salida de la unidad del reactor es la misma que a la entrada de la turbina.

Bajo estas consideraciones la ecuación representativa para el cálculo de la temperatura del Helio a la salida de la turbina es:

$$T_{STap} = \left( \frac{P_{STap}}{P_{SR}} \right) T_{fs} \quad (2)$$

donde:  $P_{SR}$  = Presión del gas a la salida del reactor

$T_{fs}$  = Temperatura alcanzada por el Helio en la remoción de calor

$P_{STap}$  = Presión del gas a la salida de la Turbina.

#### a.2) Flujo de Helio a la salida de la turbina.

Para esta parte se emplean dos ecuaciones debido al comportamiento del gas cuando la velocidad angular está debajo de 50 rps y cuando es superior a ésta.

\* Si  $\omega_{TCap} > 50$  rps, se considera que existe flujo sónico y la ecuación es:

$$G_{STap} = C v_{ap} \frac{P_{SR}}{\sqrt{T_{fs}}} \quad (1)$$

\* Si  $\omega_{TCap} < 50$  rps, la ecuación es:

$$G_{STap} = C v_{apm} \sqrt{\frac{P_{SR}^2 - P_{STap}^2}{T_{STap}}} \quad (2)$$

### a.3) Velocidad angular de la turbina de alta presión.

Para calcular esta variable es necesario establecer un balance de energía en la turbina donde la energía acumulada (Energía que entra menos Energía que sale) es igual a:

$$E_{acumulada} = \frac{d}{dt}(E_{cr} + Q) \quad (1)$$

Donde la acumulación de calor en la flecha Q es despreciable (por ser metal cuya capacidad calorífica es baja), y E<sub>cr</sub> es la energía cinética rotacional.

La energía cinética rotacional del eje, es igual a un medio del momento de inercia por el cuadrado de la velocidad angular.

$$E_{cr} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \text{donde: } I = m \frac{r^2}{2} = \text{cte} \quad (2)$$

Derivando la ecuación (2) y sustituyendo E<sub>acumulada</sub> de (1) se obtiene la rapidez de cambio, con la cual podemos obtener el valor de la velocidad angular en cualquier instante de un transitorio.

$$\frac{d\omega_{T1}}{dt} = \frac{E_{acumulada}}{I_{T1}\omega_{T1}} \quad (3)$$

### b) *Ecuaciones del Compresor de Alta Presión*

El flujo de Helio previamente enfriado en el enfriador intermedio entra al compresor de alta presión donde es comprimido hasta 8.4 MPa para después pasar al recuperador.

Para calcular este flujo en el compresor se considera que la curva de un compresor (Presión vs Flujo) sigue muy aproximadamente una trayectoria parabólica:

$$(G_{SCap} - G_0)^2 = 4f(\Delta P - P_0) \quad (1)$$

donde el punto (G<sub>0</sub>,P<sub>0</sub>) es el vértice aproximado de la curva parabólica que representa el comportamiento del compresor (Gasto vs Presión), por lo que G<sub>0</sub> y H<sub>0</sub> se pueden considerar constantes al igual que 4f ya que la distancia focal “ f ” también es constante, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$(G_{SCap} - k_1)^2 = k_2(\Delta P - k_0) \quad (2)$$

Despejando el Gasto (flujo de Helio) a la salida del compresor y haciendo k<sub>3</sub> = k<sub>2</sub>k<sub>0</sub>, además de que ΔP = P<sub>SCap</sub> - P<sub>ECap</sub> tenemos:

$$G_{SCap} = \sqrt{k_2(P_{SCap} - P_{ECap}) - k_3} + k_1 \quad (3)$$

Pero como el flujo de Helio en el compresor está también en función de la posición de los alabes guía “A<sub>Cap</sub>” y de la velocidad angular “ω<sub>CTap</sub>” del eje compresor-turbina de alta presión considerando una dependencia proporcional a estas dos variables la ecuación finalmente queda:

$$G_{SCap} = \left[ \sqrt{k_2(P_{SCap} - P_{ECap}) - k_3} + k_1 \right] A_{Cap} \omega_{CTap} \quad (4)$$

donde: P<sub>SCap</sub> = Presión del flujo de gas a la salida del Compresor de alta presión  
P<sub>ECap</sub> = Presión del flujo de gas a la entrada del Compresor de alta presión

### 6.2.2 Unidad turbo de baja presión.

Esta unidad por ser equivalente a la de alta presión se modela de la misma manera, sólo que cambiando los parámetros de entrada y por consiguiente los de salida.

La Unidad Turbo de Baja Presión esta formada por la Turbina de Baja Presión donde es nuevamente expandido el Helio y por el Compresor de Baja Presión que es movido por esta turbina.

### 6.2.3 El turbo-generador.

#### a) Ecuaciones de la Turbina de Potencia.

El helio que sale de la Turbina de Baja Presión continúa su flujo hasta expandirse en la Turbina de Potencia, proporcionando la potencia mecánica necesaria para accionar el Generador eléctrico. La turbina se modela como las dos anteriores y solamente cambian sus parámetros.

El trabajo de fricción en la flecha es proporcional a la velocidad angular al cuadrado  $W_{Ff} = k_{fr} \omega_{tg}^2$ , donde  $k_{fr}$  es la inercia de la flecha del rotor, ( $I = mr^2/2$ )

#### b) Ecuaciones del Generador

##### b.1) Ángulo de Potencia del Generador Eléctrico.

La potencia eléctrica esta en función de un ángulo entre el rotor y el estator en el generador eléctrico llamado ángulo de defasamiento o de potencia  $\Phi$ ; que se define como el desplazamiento de fase entre el voltaje interno de la máquina (E) y el voltaje terminal (V) midiéndose  $\Phi$  en radianes eléctricos. Tomándose como un ángulo especial entre dos campos magnéticos girando en el interior de la maquina. El campo magnético del rotor es físicamente producido por las corrientes que fluyen en los devanados del rotor y, girando a la velocidad angular  $\omega_{tg}$ . El campo magnético del estator físicamente se genera por el efecto combinado de los voltajes trifásicos del estator y este gira a una velocidad angular  $\omega_e$ , que se representa como:

$$\omega_e = \frac{2\pi fe}{N/2} \text{ rad}_{\text{elec}}/\text{seg} \quad (1)$$

donde:  $f_e$  = frecuencia eléctrica del sistema en Hz.

$N$  = número de polos del generador.

Para nuestro caso  $f_e$  la consideraremos constante, ya que es la frecuencia eléctrica de la red eléctrica y dependerá del lugar geográfico donde este la planta, por lo que la velocidad angular del estator  $\omega_e$ , será también constante, además como el generador se considera de 2 polos la expresión resultante es:

$$\omega_0 = \omega_e = 2\pi fe \quad (1')$$

Cuando un generador eléctrico no está sujeto a transitorios, la velocidad angular de la turbina,  $\omega_{tg}$ , la cual por ser la misma flecha en el generador es también la velocidad angular del rotor; es igual a la frecuencia de la red eléctrica (medida en ciclos por segundo, Hertz), para el caso

en que no se está regulando frecuencia, se ha considerado constante y se le llama velocidad angular de referencia  $\omega_0$ , esto es:

$$\omega_0 = \omega_{tg} \quad (2)$$

La velocidad angular de la turbina, puede verse afectada por introducción de disturbios tales como retraso o mayor demanda de kW o bien por cambio en las condiciones del proceso tales y como cambio repentino en la energía del reactor, como consecuencia de esto se genera un defasamiento angular entre el campo magnético del rotor y el del estator; a este defasamiento se le conoce también como ángulo de potencia,  $\Phi$  y la rapidez de cambio de este ángulo está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{d\Phi}{dt} = (\omega_{tg} - \omega_0)2\pi \quad (3)$$

Como se hace notar en la ecuación anterior, lo que se puede hacer cambiar a  $\Phi$ , es el cambio en la velocidad angular de la turbina,  $\omega_{tg}$ .

### b.2) Trabajo Eléctrico del Turbogenerador.

La turbina produce una torca ( $T_m$ ) en el sentido de rotación, que es controlada directamente por el flujo del gas en la turbina. Oponiéndose a esta, otra torca electromagnética ( $T_o$ ) igual, pero creada por los campos magnéticos. Siendo la potencia asociada,  $P_e(P_o = T_o \omega_m)$ , convirtiéndose a energía eléctrica. Posteriormente se explicará como se controla esta potencia o  $W_{Elc}$ . Ya que adicionalmente es necesario mantener la velocidad angular constante bajo cualquier circunstancia de cambio de carga.

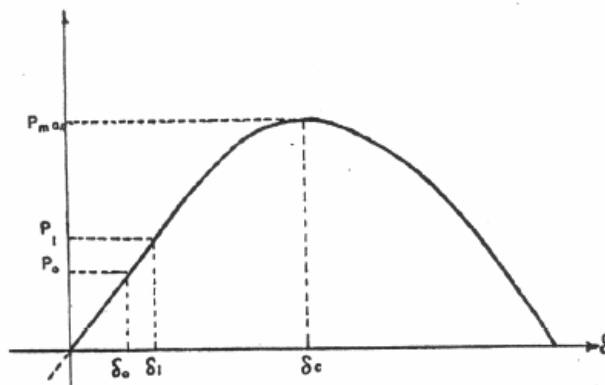
Como se dijo anteriormente  $W_{Elc}$  está en función del ángulo de los campos magnéticos del rotor y estator por lo tanto, su representación es:

$$W_{Elc} = \frac{EV}{X} \text{sen}\Phi \quad (1)$$

Ya que el objeto de este simulador es ver de forma global el comportamiento de una planta PBMR no pretendemos analizar transitorios de voltaje o corriente, por lo que podemos considerar el voltaje interno ( $E$ ), el voltaje en terminales ( $V$ ), y la reactancia sincronía ( $X$ ), como constantes. Por lo que la ecuación (1) se representa en esta forma:

$$W_{Elc} = K_{Elc} \text{sen}\Phi \quad (2)$$

La grafica de la figura 7 nos indica como se comporta la potencia  $P$  en función del ángulo de potencia  $\Phi$ .



**Figura 7: Gráfica ángulo de potencia Vs potencia generada**

En ésta se observa que un incremento de  $P_0$  a  $P_1$  provoca un aumento de  $\Phi$  desde  $\Phi_0$  a  $\Phi_1$ . Como se ve, hay un límite en los posibles aumentos de  $P_1$  a este límite  $P_{\max}$ , se le llama límite de estabilidad en régimen estacionario y se expresa de la forma  $W_{Elc} = P_{\max} = EV / X$  y el ángulo  $\Phi_c$  correspondiente, es el ángulo crítico de potencia,  $\Phi_c = 90^\circ$ . Si la potencia mecánica del rotor se incrementa aún más, el generador saldría de sincronismo, afectando el sistema. Para evitar este problema a este ángulo de potencia cuando opera en estado estable, generando lo que se conoce como carga base, se le asigna un valor mínimo que es:  $\Phi_{\text{base}} = 64.2^\circ$  como rango de seguridad.

## 7. RESULTADOS ESPERADOS

En este trabajo se presentan los avances logrados en el desarrollo de un simulador de una central nuclear tipo PBMR, los modelos antes descritos son un avance del sistema total que incluye a los modelos de los enfriadores y del recuperador, así como a los sistemas de monitoreo y control los cuales se están analizando actualmente. Estos modelos son la base del simulador el cual se realiza a partir de ellos y en la plataforma Matlab-Simulink.

Como resultado del método de simulación que se eligió para el desarrollo del simulador del PBMR, se espera tener una simulación en tiempo continuo, con tiempos de respuesta similares a los que se tendría en la planta real o incluso más rápido, considerando que algunos procesos reales tardan hasta varios minutos en mostrar cambios perceptibles, y que en el simulador pueden observarse estos en pocos segundos.

Del simulador se espera que cumpla con los modelos de los cuales está formado, de manera integrada y confiable, de forma tal que de acuerdo a los parámetros y rangos de las señales determinados, efectuó las transformaciones indicadas y presente las señales dentro de los esquemas lógicos de operación de los diversos componentes de la planta.

El simulador tendrá una interfaz de usuario de fácil acceso, intuitiva en su manejo y con posibilidad de visualizar los valores e información de los procesos de la planta. La interfaz contará también con la posibilidad de alterar valores de válvulas o controles propios de la operación de la planta y de observar en tiempo real los resultados de la alteración realizada.

Los sistemas deberán residir en un entorno de simulación matemática como lo es matlab y la interfaz se ejecutara con el mismo Simulink, donde la simulación puede ejecutarse sin la presencia de la interfaz gráfica de manera que los modelos puedan depurarse de manera fácil e inmediata.

Por su parte la interfaz también podrá ejecutarse independientemente con algunas modificaciones mínimas, de manera que pueda alterarse o agregarse funcionalidad, sin depender de valores de la simulación, con lo que la interfaz puede ser mejorada continuamente en futuras revisiones.

En general el simulador debe cumplir con el objetivo de ser atractivo para los inexpertos y los nuevos estudiantes recién allegados a las disciplinas nucleares, Los modelos aunque sencillos, deben ser lo suficientemente formales y exactos para proveer señales que se comporten lo más aproximado a los sistemas reales.

Referencias:

- [1] <http://www.world-nuclear.org/sym/1999/kemm.htm>
- [2] <http://www.ratical.org/radiation/PBMRintro1.html>