

Modelado de la Dinámica de la Vasija y Circuitos de Recirculación de una Nucleoeléctrica tipo BWR como parte del Simulador Universitario SUN-RAH

Raymundo Adán Sánchez Salazar

Laboratorio de Análisis de Ingeniería de Reactores Nucleares

DEPFI, Campus Morelos, en IMTA Jiutepec Morelos

Universidad Nacional Autónoma de México

e-mail: rsanchez_15@yahoo.com.mx

Asesor: Dr. Jaime B. Morales Sandoval

Resumen

En el presente proyecto, se presenta el desarrollo de un modelo para la dinámica del proceso de transporte de energía generado en el combustible nuclear hasta las líneas de vapor principal de una central nucleoelectrica con reactor nuclear del tipo BWR, utilizando modelos matemáticos de orden reducido. Estos modelos presentan las características principales de la vasija del reactor y del sistema de recirculación, definidas por los principales fenómenos que intervienen en los procesos físicos. Así mismo, se describe el objetivo del proyecto general del Simulador Universitario de Nucleoeléctricas con Reactor de Agua Hirviente (SUN-RAH) para posteriormente establecer las ecuaciones modeladas para cada parte del reactor nuclear así como del sistema de seguimiento de carga. Además, se describen también las interfaces gráficas implementadas en una arquitectura tres capas en la que las distintas variables medibles son presentadas en el monitor. Cabe señalar que la ventaja presentada por el Simulador Universitario de Nucleoeléctricas es la posibilidad de realizar cambios en las magnitudes de las distintas variables que intervienen en los procesos físicos efectuados en el reactor y en el sistema de recirculación en tiempo de ejecución del mismo. De igual manera, la creación de una interfaz gráfica intuitiva, amigable, y diseñada con la misma tecnología con la que se programan los videojuegos en la actualidad. Además de todo lo anterior, se exponen las metas pendientes dentro del proyecto, así como los desarrollos en proceso de construcción o conceptualizados para ser incluidos en versiones futuras del simulador. Finalmente se plantean posibles escenarios de aplicaciones de SUN-RAH, así como sus alcances.

1. INTRODUCCIÓN

Las reacciones nucleares en cadena de pueden controlar, y la energía se puede utilizar como fuente de potencia. El dispositivo en que se puede llevar a cabo una fisión de reacción autosostenida en condiciones controladas se denomina Reactor Nuclear. La clave para el uso de la fisión dentro de un reactor es el control del proceso de tal manera que no se llegue a producir liberaciones no controladas de energía o radioactividad.

En la actualidad hay varios tipos de reactores de potencia que han alcanzado la etapa comercial y operado durante décadas hasta considerarse hoy en día como centrales de tecnología madura. Los tipos principales son:

- Reactores de agua Hirviendo (BWR por sus siglas en inglés).
- Reactores de agua a presión (PWR).
- Reactores de Agua pesada (HWR).
- Reactores enfriados por gas (GCR).

En el presente trabajo se ha tomado el Reactor de Agua Hirviente como planta a modelar.

Aplicando el concepto de *modularidad* de software, y para describir los distintos procesos que ocurren en estos reactores, se seleccionaron cuatro grandes bloques: Modelo de Recirculación, Modelo de Núcleo y Pleno, Modelo de los Separadores de Vapor y el Modelo del Domo de la vasija del reactor.

Dado que este simulador es parte central del Simulador Universitario de Nucleoeléctricas (SUN-RAH), entonces se ha utilizado una programación con plataforma Windows, utilizando a MATLAB como lenguaje de simulación. MATLAB fue seleccionado además, por su capacidad de interactuar con el lenguaje Visual C++, que es el lenguaje seleccionado para programar la interfaz gráfica de usuario. A partir de lo anterior, cada uno de los módulos se programaron como funciones de MATLAB, y para fines de prueba han sido simulados en SIMULINK.

2. OBJETIVO.

El objetivo de este proyecto es desarrollar el simulador completo de un reactor nuclear tipo BWR que cumpla con el doble propósito de apoyar a los cursos de licenciatura y postgrado relacionados con reactores nucleares, así como centrales eléctricas de potencia y en el entrenamiento de ingenieros y especialistas en dinámica de neutrones, transferencia de calor, flujo bifásico, operación de sistemas de control, protección y de emergencia de una planta típica.

3. MÓDULOS PRINCIPALES.

A continuación se hace una breve descripción de los modelos y módulos que integran este simulador.

3.1 Interfaz de Usuario

La interfaz de usuario del simulador se desarrolla, para entornos Windows, en el lenguaje de programación Visual C++ 6.0 Edición Profesional. Para hacer uso de las funciones gráficas de Windows, se emplean las librerías y componentes denominados por Microsoft, como DirectX, en su versión 8.1. Estas extensiones de Windows, requieren la carga de los interpretes de las librerías (Plug-in, Dll's, etc.), y que el programador use las librerías en forma de código fuente. Ambas implementaciones (programador y cliente) son proporcionadas por Microsoft de manera gratuita, junto con una extensa documentación. SUN-RAH emplea las extensiones DirectX, en modo de

acceso directo, por lo que la mayoría de las primitivas geométricas que se emplean en las representaciones graficas tipo Windows usuales, no están disponibles de manera directa e inmediata. Este modo de programación de interfaces gráficas, permite tener un control total de lo que se representará en pantalla, sin las restricciones propias de los entornos gráficos clásicos de aplicaciones Windows. Todos los elementos que se perciben en las diversas pantallas que el simulador presenta, fueron colocados por el programador, los elementos dinámicos de las pantallas fueron diseñados para lograr una representación clara y agradable a la vista. Varios de los elementos que se muestran en la Interfaz, son independientes del elemento al que representan, por lo que se pueden reutilizar en diferentes dispositivos o situaciones. De esta manera las graficas, medidores, despliegues, etc., son reutilizables y configurables a voluntad.

El programa de interfaz, también contiene, programas y subrutinas, que se encargan de pedir a un interprete de Matlab, que se ejecute una simulación en un cierto tiempo, y que se transfieran los datos que se hayan calculado en la simulación a los dominios del programa, así como también de alterar los valores de entrada o parámetros de los modelos a simular a petición del programa de interfaz, respondiendo a acciones del usuario o a actualizaciones resultado de cálculos internos.

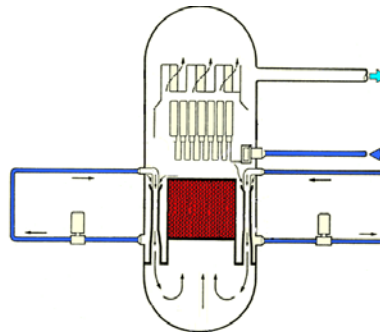


Figura 1. Interfaz Gráfica de Usuario para el Monitoreo de Variables

3.2 Modelo de Recirculación

La obtención del flujo másico total que ingresa al núcleo del reactor W_{cin} es a partir de los flujos de recirculación del sistema:

$$W_{cin} = N_1 W_{RL1} + N_2 W_{RL2} \quad (1)$$

donde:

N_1, N_2 : nos da los ciclos de recirculación representada por lazo de recirculación
 W_{RL1}, W_{RL2} Flujos de recirculación en el ciclo 1,2

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{\bar{\ell}_{dif}}{A_{dif}} + N_i \left(\sum_C \frac{\ell_c}{A_c} \right) + \frac{\ell_{LP}}{A_{LP}} + \frac{\ell_b}{A_b} \right] \frac{dW_{RLi}}{dt} = (P_{thi} - P_{jeti}) + (P_d - P_u) + \\
 & + g \left[\bar{\rho}_r \Delta Z_{dif} + \bar{\rho}_b (\Delta Z_b + L_V) - \bar{\rho}_c \Delta Z_c - \bar{\rho}_p \Delta Z_{PL} \right] - (K_1 + K_c + K_m) W_{31}^2 - \\
 & - \left(K_b + K_{dif} - \frac{1}{2A_{th}^2 \bar{\rho}_r} \right) W_{RLi}^2 - \left(K_{SCT} + \frac{1}{2A_{SCT}^2 \bar{\rho}_b} \right) W_{SCTi}^2 - \left(\sum_C \frac{\ell_c}{A_c} \right) \left(\frac{dW_{RL}}{dt} \right)_{OTRA VUELTA}
 \end{aligned} \quad (2)$$

La ecuación (2) puede ser rescrita como el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 a_1 W_{RL1} &= c_1 - b_2 W_{RL2} && \text{para } i = 1 \text{ y} \\
 a_2 W_{RL2} &= c_2 - b_1 W_{RL1} && \text{para } i = 2; \text{ en donde}
 \end{aligned}$$

$$a_i = \frac{1}{g_c} \left[\frac{\bar{\ell}_{dif}}{A_{dif}} + N_i \left(\sum_C \frac{\ell_c}{A_c} \right) + \frac{\ell_{LP}}{A_{LP}} + \frac{\ell_b}{A_b} \right] \quad (3)$$

donde:

g_c : Factor de conversión de la ley de Newton

$\frac{\bar{\ell}_{dif}}{A_{dif}}$: Relación de la longitud efectiva del difusor de la bomba jet y su área

N_i : Número de ciclos de recirculación. $i = 1, 2$

$\sum_C \frac{\ell_c}{A_c}$: Relación de la longitud efectiva y el área a través del núcleo y la salida del pleno superior del núcleo.

A_{LP} : Sección transversal del flujo de entrada al pleno superior del núcleo.

ℓ_{LP} : Longitud del camino de flujo de entrada al pleno superior del núcleo.

ℓ_b : Longitud de la región de bulto en el domo de la vasija

A_b : Sección transversal de la región de bulto en el domo de la vasija.

$$\begin{aligned}
 c_i &= 144(P_{thi} - P_{jeti}) + 144(P_d - P_u) + g \left[\bar{\rho}_r \Delta Z_{dif} + \bar{\rho}_b (\Delta Z_b + L_V) - \bar{\rho}_c \Delta Z_c - \bar{\rho}_p \Delta Z_{PL} \right] - \\
 & - (K_1 + K_c + K_m) W_{cin}^2 - \left(K_b + K_{dif} - \frac{1}{2A_{th}^2 \bar{\rho}_r} \right) W_{RLi}^2 - \left(K_{SCT} + \frac{1}{2A_{SCT}^2 \bar{\rho}_b} \right) W_{SCTi}^2
 \end{aligned} \quad (4)$$

donde:

P_{thi} : Presión en la garganta de la bomba jet

P_{jeti} : Presión en la boquilla de salida de la bomba jet

P_u : Presión de entrada al núcleo

P_d : Presión del domo de la vasija

g : Aceleración gravitacional

L_V : Nivel de mezcla real de la vasija

K_c : Coeficiente de fricción del núcleo

- K_b : Coeficiente de fricción de bulto en el domo de la vasija
 K_{dif} : Coeficiente de fricción del difusor de la bomba jet
 A_{th} : Área de la garganta de la bomba jet
 W_{RLi} : Flujo de recirculación en el ciclo i -ésimo donde $i = 1, 2$
 K_{SCT} : Coeficiente de fricción de succión
 A_{SCT} : Sección transversal del flujo de succión
 W_{SCTi} : Flujo de succión en el ciclo i -ésimo donde $i = 1, 2$

y finalmente

$$b_i = \left(\sum_C \frac{\ell_c}{A_c} \right) \left(\frac{N_i}{g_c} \right) \quad (5)$$

de donde se tiene finalmente el siguiente sistema de ecuaciones simultaneas:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_2 \\ b_1 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{RL1} \\ W_{RL2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para el cálculo de la ecuación de estado del flujo de recirculación de drive se tiene

$$W_{di} = \frac{144(P_{downi} + \Delta p_{pi} - P_{jeti}) - (K_d + K_{noz})W_{di}^2 - \frac{W_{di}^2}{2\rho_r g_c A_{noz}^2}}{\frac{1}{g_c} \left(\frac{\ell_D}{A_D} + \frac{\ell_{RL}}{A_{RL}} \right)} \quad (7)$$

- W_{di} : Flujo de drive en el ciclo i -ésimo donde $i = 1, 2$
 A_{noz} : Área de la boquilla de la bomba jet
 P_{downi} : Presión en el downcomer del i -ésimo ciclo.
 Δp_{pi} : Cabeza de la bomba en la i -ésima línea de recirculación.
 P_{jeti} : Presión de salida de la boquilla de la bomba jet
 K_{noz} : Coeficiente de Salida de la boquilla de la bomba jet
 K_d : Coeficiente de fricción en el ciclo de drive
 A_D : Sección transversal del flujo del Downcomer
 A_{RL} : Sección transversal de la línea de recirculación.
 ℓ_{RL} : Longitud de la línea de recirculación
 ℓ_D : Longitud del camino de flujo en el downcomer

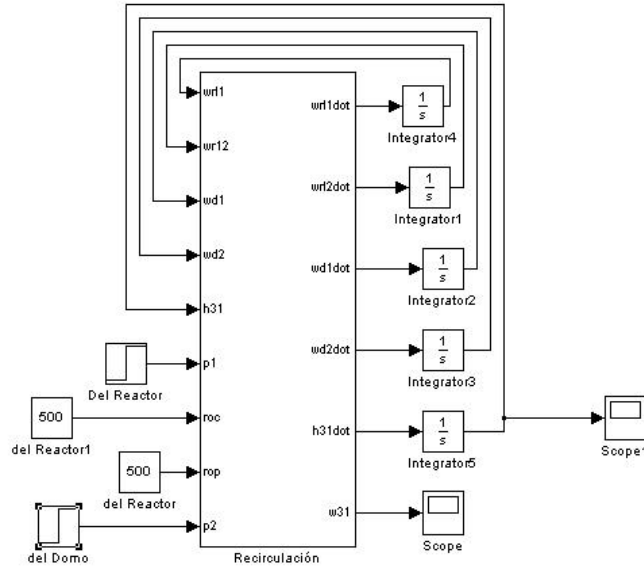


Figura 2. Modelo en Simulink del Sistema de Recirculación

3.3 Núcleo y Pleno del Reactor

Para la simulación del núcleo del reactor y el pleno superior, se tomarán en cuenta tomando en consideración las entradas, parámetros y ecuaciones algebraicas de los modelos.

Cabe recordar que las unidades de todas las variables físicas se encuentran en las unidades del Sistema Internacional.

Parte del agua durante su recorrido por el núcleo del reactor es evaporada, y parte de ella se mantiene en fase líquida pero alcanza condiciones de saturación. Lo anterior debe a que cierta proporción (1-b) del agua, pasa directamente por el combustible, por lo que alcanza su punto de ebullición. Pero otra parte (b) pasa entre los espacios existentes entre los encamisados del ensamble combustible, por lo que, al no estar en contacto directo con las barras de combustible, no alcanzan su punto de ebullición.

Por la Ley de Conservación de la Masa, sabemos que la masa que ingresa al núcleo del reactor, es la masa que sale de éste, aunque en distintos estados físicos, por lo que podemos decir que:

$M_{fp} + M_{gp} = M_p$. Si despejamos M_{fp} de la ecuación, podríamos calcular la masa de líquido en el pleno de la vasija.

Para el cálculo de la masa del líquido saturado existente en el pleno de la vasija se tiene:

$$M_{fp} = M_p - M_{gp} \tag{8}$$

donde:

M_{fp} : Masa de líquido saturado en el pleno de la vasija.

M_p : Total de masa en el pleno de la vasija.

M_{gp} : Masa de vapor en el pleno de la vasija.

Dentro del núcleo, la energía se encuentra en un constante crecimiento, desde la entrada del agua al núcleo hasta su salida de éste. En funcionamiento de estado estable, la energía aumenta a lo largo del paso de agua por el núcleo. Sin embargo, consideraremos la energía promedio a lo largo de este proceso.

Por la Ley de la Conservación de la Energía, nuestra energía inicial h_{sc} en este proceso no se pierde, por lo que actúa en todo momento del proceso. Por otra parte, calculamos con anterioridad el factor de subenfriamiento Δh y conocemos el centro de calor.

Para el cálculo de la entalpía promedio del líquido subenfriado en el núcleo se tiene que:

$$h_{sub} = f_s \Delta h_{sub} + h_{cin} \quad (9)$$

donde:

h_{sub} : Entalpía promedio del líquido subenfriado en el núcleo

f_s : Centro de calor en la región de subenfriamiento

Δh_{sub} : Subenfriamiento a la entrada del núcleo

h_{cin} : Entalpía del líquido en la entrada del núcleo

Por definición, sabemos que la densidad de un fluido es igual a la relación existente entre la masa del fluido y su volumen. De lo anterior podemos concluir que la masa del fluido es igual al producto de su densidad y la cantidad de espacio que ocupa.

En el caso de la masa de vapor existente en el núcleo, podemos utilizar la propiedad física mencionada anteriormente. Sin embargo, esta masa de vapor se encuentra en aumento al pasar el agua por el núcleo, por lo que una aproximación a dicha cantidad de masa existente en el núcleo, podemos hacerla multiplicando el factor α .

Para el cálculo de la masa de vapor en el núcleo se tiene:

$$M_{gc} = \alpha \rho_{gu} V_{TC} \quad (10)$$

donde:

M_{gc} : Masa de vapor en el núcleo

α : Fracción promedio de vacíos en el núcleo

ρ_{gu} : Densidad de vapor a la entrada del núcleo

V_{TC} : Volumen total de núcleo

Finalmente, y utilizando el mismo concepto de densidad, se calcula la densidad promedio existente en el núcleo. Matemáticamente se obtiene: $\bar{\rho}_c = M_{TC} / V_{TC}$. Sin

embargo, por conservación de la masa, tenemos que la masa total existente en el núcleo del reactor podemos verla como la suma de las masas contenidas en él, es decir, masa líquida, gaseosa y la de subenfriamiento. Dicho de otra forma $M_{TC} = M_{sub} + M_{fc} + M_{gc}$, por lo que finalmente se tiene que para el cálculo de la densidad promedio en el núcleo:

$$\bar{\rho}_c = \frac{1}{V_{TC}} (M_{Sub} + M_{fc} + M_{gc}) \quad (11)$$

donde:

- $\bar{\rho}_c$: Densidad promedio en el núcleo
- M_{sub} : Masa de líquido subenfriado en el núcleo
- M_{fc} : Masa de líquido saturado en el núcleo

Por conservación de la masa, sabemos que la masa total de fluido en el pleno de la vasija y en el núcleo es la suma de la masa del núcleo y la masa del pleno, es decir $M_{c+p} = M_P + M_C$. De igual forma, sabemos que la masa total del núcleo es igual al producto de la densidad total del núcleo por el volumen total del mismo, es decir $M_C = \bar{\rho}_c V_{TC}$, los cuales se conocen de los anteriores cálculos..

Para el cálculo de la masa de fluido en el pleno de la vasija se tiene:

$$M_P = M_{c+p} - \bar{\rho}_c V_{TC} \quad (12)$$

donde:

- M_{c+p} : Total de masa de fluido en el pleno de la vasija y en el núcleo.

Por otra parte, y ayudándonos de la Ley de la Conservación de la Masa, sabemos que el volumen total del pleno, es la suma del volumen de líquido y de vapor que le llegan, es decir, $V_P = V_{fp} + V_{gp}$. Así mismo, sabemos por el concepto de densidad que el volumen del líquido en el pleno, es calculable a partir de la relación existente entre la masa de fluido en el pleno y su densidad, es decir $V_{fp} = \frac{M_P}{\rho_{fl}}$. Además, utilizando el

mismo concepto de densidad, tenemos que la masa de vapor en el pleno puede calcularse como el producto de la densidad del vapor en el pleno y el volumen que ocupa, por lo que tenemos: $M_{gp} = \rho_{fgl} V_{gp}$. Realizando los despejes y sustituciones respectivas, tenemos para el cálculo de masa de vapor en el pleno de la vasija se tiene:

$$M_{gp} = \rho_{fgl} \left[V_P - \frac{M_P}{\rho_{flu}} \right] \quad (13)$$

donde:

- M_{gp} : Masa de vapor en el pleno de la vasija

V_P : Volumen total del pleno de la vasija
 M_P : Masa total de fluido en el pleno de la vasija

Para el cálculo del Denominador de la ecuación de tasa de presión del núcleo se tiene:

$$D_u = \left[(M_{fc} + M_{fp}) \frac{dh_{fu}}{dP} + (M_{gc} + M_{gp}) \frac{dh_{gu}}{dP} - (V_{BC} + V_P) \right] - \left[h_{fg1} \rho_{fg1} \left[(M_{fc} + M_{fp}) \frac{d}{dP} \frac{1}{\rho_{fu}} + (M_{gc} + M_{gp}) \frac{d}{dP} \frac{1}{\rho_{gu}} \right] \right] \quad (14)$$

donde:

D_u : Denominador de la ecuación de tasa de presión del núcleo
 h_{f1} : Entalpía del líquido en condiciones de saturación
 h_{g1} : Entalpía de vapor saturado a presión
 V_{BC} : Volumen de núcleo saturado
 V_P : Volumen del pleno de la Vasija
 h_{fg1} : Calor de vaporización
 ρ_{fg1} : Densidad del vapor en el pleno
 ρ_{f1} : Densidad del líquido en el núcleo
 ρ_{g1} : Densidad del vapor en el núcleo

Aplicando la Ley de la Conservación de la Masa, la Ley de la Conservación de la Energía y la Ley de la Conservación del Momento, podemos calcular la tasa de presión del núcleo. Para el cálculo de la ecuación de tasa de presión del núcleo se tiene:

$$\dot{P}_u = \frac{1}{D_u} \left(Q_B - W_{gu} h_{fg1} + \frac{1}{\frac{\rho_{fu}}{\rho_{gu}} - 1} h_{fg1} (W_{cin} - W_{sep} + W_{CS}) - b W_{cin} \Delta h - W_{cs} (h_{fu} - h_{CS}) \right) \quad (15)$$

donde:

P_u : Presión en la región del núcleo
 Q_B : Energía calorífica para hervir el moderador
 W_{gu} : Flujo de vapor dejando el pleno
 h_{fg1} : Calor de vaporización
 W_{cin} : Flujo en la entrada de la vasija
 W_{Sep} : Flujo total en el separador
 W_{CS} : Flujo de alta presión Core Spray
 ℓ : Fracción de flujo de bypass del núcleo
 h_{fu} : Entalpía del líquido en condiciones de saturación

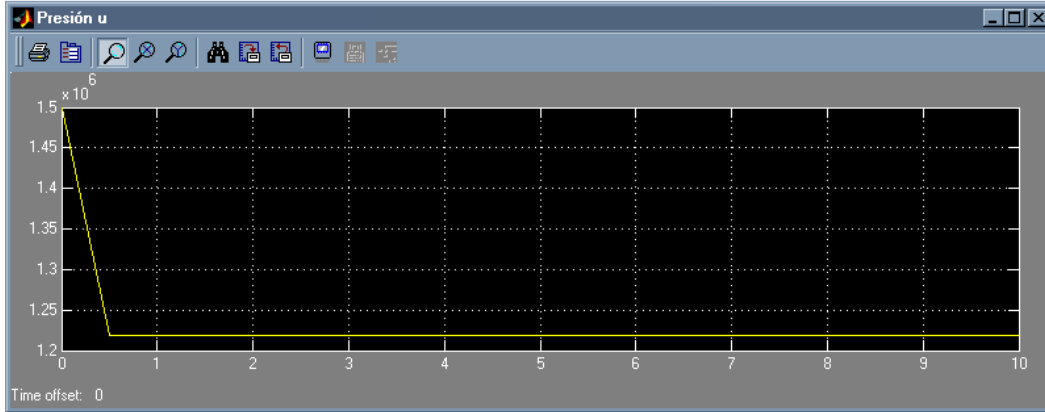


Figura 3. Monitoreo en Simulink de la Presión en la Región del Núcleo

Para el cálculo de la Masa de líquido subenfriado en el núcleo se tiene:

$$\dot{M}_{Sub} = \frac{(1 - \ell)\Delta h W_{cin} - Q_S + M_{sub} \left(\bar{h}_{SC} - \frac{P_u}{\rho_l} \right)}{h_{fu} - \bar{h}_{Sub}} \quad (16)$$

donde:

- ℓ : Fracción de flujo de bypass del núcleo
- Q_S : Energía calorífica para subenfriar el moderador
- ρ_l : Densidad del líquido

Puede apreciarse, que para calcular el total de masa de fluido en el pleno de la vasija y en el núcleo como ecuación de estado, debe tomarse en cuenta el flujo a la entrada a la vasija, así como el flujo total en el separador, que visto de otra forma, es el flujo que entrega el pleno al separador, es decir, se considera la tasa de cambio que sufre el fluido desde la entrada hasta su salida. Para el cálculo del Total de masa de fluido en el pleno de la vasija y en el núcleo se tiene:

$$\dot{M}_{c+p} = W_{cin} - W_{stmsep} + W_{sep} \quad (17)$$

donde:

- W_{cin} : Flujo en la entrada de la vasija

3.4 Modelo del Separador de Vapor.

Por un lado, sabemos que existe la relación siguiente:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \right) \dot{W}_{zu} = 144(P_u - P_d) - g\bar{\rho}_p \ell_{SEP1} - \Delta P_{SEP}. \text{ Así mismo, se sabe que, por conservación de}$$

la masa, que el flujo total en los separadores es igual al flujo en fase líquida mas el flujo en fase gaseosa, por lo que podemos decir que $W_{fu} + W_{gu} = W_{sep}$. Si derivamos ambos miembros de la expresión respecto del tiempo, y despejando la masa de líquido, nos

queda $\dot{W}_{fu} = \dot{W}_{sep} - \dot{W}_{gu}$, lo que implica que podemos sustituir en la primera ecuación el valor de cambio \dot{W}_{fu} . Para el cálculo del cambio del flujo total en el separador respecto al tiempo se tiene:

$$\dot{W}_{Sep} = \dot{W}_{uu} + \frac{1}{\lambda} [\hat{A}[(P_u - P_d) - \Delta P_{SEP}] - g \rho_P \ell_{SEP1} \hat{A}] \quad (18)$$

donde:

- λ Longitud efectiva en los separadores
- W_{uu} Flujo de vapor dejando el pleno
- \hat{A} Sección transversal del separador de flujo rotacional
- P_u Presión en la entrada del núcleo
- P_d Presión en el domo de la vasija
- ΔP_{SEP} Caída de presión a través de los separadores
- g Aceleración de la gravedad
- ℓ_{sep1} Longitud de la barra del separador

Flujo de vapor dejando los separadores, dado su proporcionalidad directa con el flujo total en el separador, puede verse como una fracción de éste, en proporción a la calidad a la salida del separador. Para el cálculo de Flujo de vapor dejando los separadores se tiene:

$$W_{ud} = \chi_{Pd} W_{SEP} \quad (19)$$

donde:

- W_{ud} Flujo de vapor dejando los separadores
- χ_{Pd} Calidad a la salida del separador

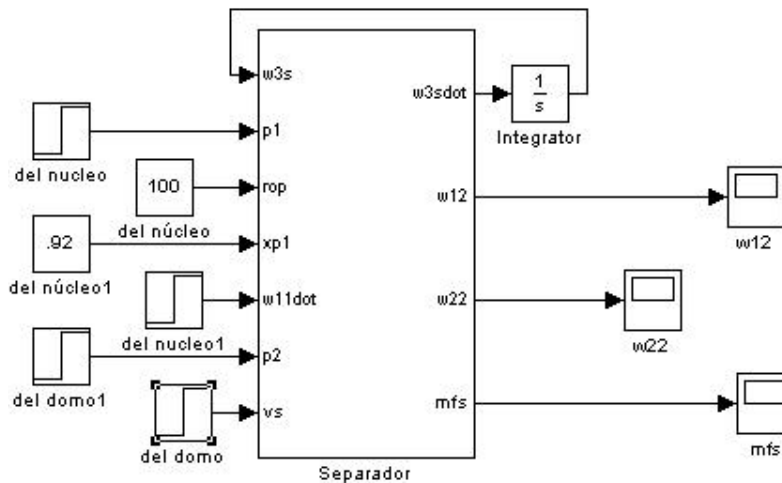


Figura 4. Modelo en Simulink de los Separadores

3.5 Modelado del Domo de la Vasija

Para la obtención del flujo de líquido dejando la vasija se tiene:

$$W_{dwn} = \frac{W_{cin} - W_{fw} - W_{ci}}{1 + \frac{M_{gb}}{M_{fb}}} \quad (20)$$

donde:

W_{dwn} Flujo de líquido dejando la vasija

W_{cin} Flujo de Entrada al núcleo

W_{fw} Flujo de agua de alimentación

W_{ci} Flujo de inyección de refrigerante a alta presión

M_{gb} Masa de vapor entrando al bulto de la vasija

M_{fb} Masa de líquido saturado entrando al bulto de la vasija

Para la obtención del Denominador de la ecuación de la tasa de presión de la vasija se tiene:

Para $M_{gb} > 0$ se tiene:

$$D_d = (M_{fb} + M_{fs}) \frac{dh_{fd}}{dP} + (M_{gd} + M_{gb}) \frac{dh_{gd}}{dP} - V_d - h_{fgd} \rho_{fgd} \left[(M_{fb} + M_{fs}) \frac{d}{dP} \frac{1}{\rho_{fd}} + (M_{gd} + M_{gb}) \frac{d}{dP} \frac{1}{\rho_d} \right]$$

donde:

D_d Denominador de la ecuación de la tasa de presión de la vasija

M_{fs} Masa de líquido saturado en los separadores

h_{fd} Entalpía del líquido de saturación en el nodo de presión de la vasija

M_{gd} Masa de vapor en el domo de la vasija

h_{gd} Entalpía de vapor en el nodo de presión del domo

V_d Volumen del nodo del domo de la vasija

h_{fgd} Calor de vaporización

y para $M_{gb} = 0$ y $\dot{P}_d > 0$; $W_{cu} = 0$ y

$$D_d = M_{fs} \frac{dh_{fd}}{dP} + M_{gd} \frac{dh_{gd}}{dP} - V_d - h_{fgd} \rho_{fgd} \left[M_{fs} \frac{d}{dP} \frac{1}{\rho_{fd}} + M_{gd} \frac{d}{dP} \frac{1}{\rho_{gd}} \right] \quad (21)$$

Aplicando la Ley de la Conservación de la Masa, la Ley de la Conservación de la Energía y la Ley de la Conservación del Momento, podemos calcular la tasa de presión del domo. Para la obtención del Cambio de la presión en el domo respecta al tiempo se tiene:

$$\dot{P}_d = \frac{1}{D_d} \left[h_{fgd} \rho_{fgd} \left(\frac{W_{fs} - W_{dwn}}{\rho_{fd}} + \frac{W_{gs} - W_{stm} - W_{cu}}{\rho_{gd}} \right) \right] \quad (22)$$

donde:

\dot{P}_d Cambio de la presión en el domo respecta al tiempo

ρ_{fgd} densidad del líquido a la presión del domo

- W_{fs} Flujo de líquido dejando los separadores
- W_{dwn} Flujo de liquido bajando hacia el downcomer
- W_{gs} Flujo de vapor dejando los separadores
- W_{stm} Flujo de vapor dejando la vasija
- W_{cu} Flujo de Carryunder
- ρ_{fd} Densidad de líquido de saturación a presión del domo
- ρ_{gd} Densidad de vapor a presión del domo

El cambio de la masa de líquido saturado en el domo de la vasija respecto al tiempo, puede ser también visto como un flujo resultante de flujos como el Flujo de vapor dejando los separadores y el flujo de vapor dejando la vasija. De igual manera, la fracción de carryunder juega un papel muy importante al ser multiplicado por el flujo de líquido dejando los separadores.

Para la obtención del Cambio de la masa de líquido saturado en el domo de la vasija respecto al tiempo se tiene:

$$\frac{dM_{fd}}{dt} = W_{gs} - x_{cu}W_{fs} - W_{ustm} \tag{23}$$

donde:

- \dot{M}_{fd} Cambio de la masa de líquido saturado en el domo de la vasija respecto al tiempo
- x_{cu} Fracción de Carryunder
- W_{ustm} Flujo de vapor dejando la vasija

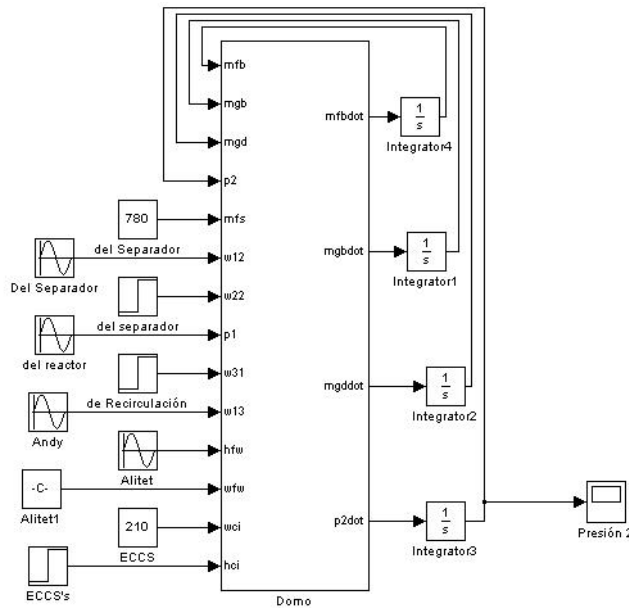


Figura 5. Modelo en Simulink del Domo de la Vasija

4. CONCLUSIONES

Este trabajo describe el desarrollo de un simulador que representa la dinámica de un reactor nuclear de agua hirviente, utilizando modelos de orden reducido e implementados en MATLAB con una interfaz de usuario para Windows y que a su vez, será utilizado en el Simulador Universitario de Nucleoeléctricas con Reactor de Agua Hirviente (SUN-RAH). El aprendizaje logrado durante el desarrollo de modelos de orden reducido, ha sido muy motivador para desmitificar la operación de componentes de la planta y del reactor, además de la utilidad de esta herramienta como medio para conocer los sistemas y respuesta de la planta de manera integrada. El Modelo del reactor y el SUN-RAH aún se encuentran en proceso de verificación y tiene varias etapas por desarrollar como son la implementación en un portal de Internet para acceso múltiple del ejecutable y el modelado de la contención de la planta.

REFERENCIAS

1. Nuclear Reactor Engineering, Glasstone, Samuel & Sesonske, Alexander D. Van Nostrand Company, INC. (1967).
2. Reactores de Potencia, Padilla Tinajero José Manuel y Ávalos Arzate Guillermo Limusa (1999).
3. Sistemas de Control en Tiempo Discreto, K. Ogata, Prentice-Hall, 2da Edición
4. J. Lewins Nuclear Reactor Kinetics and Control, Pergamon Press. ISBN 0-08-021681-1.
5. Richard T. Lahey, F.J. Moody, The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor.