

“ PLATAFORMA DE SIMULACIÓN DE LA CINÉTICA PUNTUAL ”

***CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

**Alumno: Aníbal Carlos DI LUCH
Director: Pablo BELLINO**

Noviembre 2011

ÍNDICE

1.1	Introducción	04
1.2	Ecuaciones de la cinética puntual a 6 grupos de neutrones retardados	05
1.3	Determinación de las condiciones iniciales	05
1.4	Programación en diagramas de bloques en Matlab - Simulink®	07
2.1	Comparación de algunos resultados analíticos y los obtenidos en la simulación	10
2.2	Agregado de reactividad a un reactor crítico sin fuente: 2 casos de estudio	10
2.2.1	Primer caso: agregado de $\beta = 0,1$	10
2.2.2	Segundo caso: agregado de $\beta = -2$	12
2.3	Salto Instantáneo	14
2.4	Respuesta de la Potencia para distintos agregados de reactividad desde $\beta = 0,1$ hasta 1	17
2.5	Respuesta en potencia a distintos agregados de reactividad tipo rampa	19
2.5.1	Caso 1: 0,1 \$/seg	19
2.5.2	Caso 2: 0,01 \$/seg	20
2.5.3	Caso 3: 0,001 \$/seg	21
2.6	Análisis de la respuesta de la potencia ante una reactividad tipo “rampa(+) / constante / rampa(-)”	22
2.7	Reactor subcrítico con fuente	25
2.7.1	Caso 1: Reactor subcrítico en $\beta = -0.3$, inserción de $\beta = -0.2$	25
2.7.2	Caso 2: Reactor subcrítico en $\beta = -0.3$, inserción de $\beta = -0.7$	26
2.7.3	Caso 3: Reactor subcrítico en $\beta = -10$, inserción escalonada de $\beta = 5, 2.5, 1.25$	27
2.7.4	Caso 4: Reactor subcrítico en $\beta = -0.3$, inserción escalonada de $\beta = 0.15, 0.075, 0.0375, 0.01875, 0.009375, 0$	28
2.8	Análisis de la respuesta de la potencia para una fluctuación periódica de la reactividad tipo senoidal	29
3.1	Fotoneutrones: resolución de la cinética puntual con 6 grupos de neutrones retardados y 9 grupos de fotoneutrones	30
4.1	Simulación en tiempo real	31
5.1	Aplicación al reactor CAREM	36

6.1 Conclusiones	38
Anexo I: Descripción del método numérico utilizado	39
Anexo II: Resolución de la ecuación in-hour	42
Anexo III: Simulador CAREM	47
Referencias bibliográficas	50

1.1 Introducción

El modelo de la cinética puntual permite describir la evolución temporal de un reactor nuclear. Si bien es un modelo aproximado, en muchos casos de interés describe correctamente a los sistemas estudiados. Su gran ventaja radica en la simplicidad de las ecuaciones que se propone, donde se elimina toda dependencia espacial y energética en el flujo neutrónico. A pesar de ello, se vuelve necesario resolver a la cinética puntual de forma numérica, pues soluciones analíticas sólo existen en un reducido número de casos.

El objetivo principal de la presente tesina es generar una plataforma de simulación versátil de la cinética puntual a 6 grupos de neutrones retardados y 9 grupos de fotoneutrones. Con ella se podrá resolver la cinética directa, es decir, ingresando la señal de reactividad poder conocer la evolución de la potencia neutrónica.

La resolución numérica se basa en programación en diagramas de bloques utilizando el software Matlab – Simulink.

Se validarán algunas de las soluciones simples con las soluciones analíticas y se estudiará el método de resolución de las ecuaciones y su discretización.

Luego se resuelven y analizan casos particulares como ser inserciones de escalones y rampas de reactividad y otros casos de interés en reactores nucleares.

Posteriormente, se propondrá aplicar el programa a situaciones de interés, en particular, se comparará esta plataforma con el simulador del reactor CAREM utilizado para probar el sistema de control distribuido (hecho a un grupo de neutrones retardados).

Por último, se utilizará la simulación para generar una salida en tiempo real de los parámetros (tanto la reactividad como la densidad neutrónica). Para ello se utilizará una computadora industrial con una tarjeta de adquisición de datos, la cual proporcionará una salida en voltaje proporcional a la densidad neutrónica.

1.2 Ecuaciones de la cinética puntual a seis grupos de neutrones retardados

Las ecuaciones de la cinética puntual son clasificadas como ODEs (ecuaciones diferenciales ordinarias) y se resolverán en forma directa, es decir, conociendo la reactividad se hallará la potencia neutrónica.

$$\begin{aligned}\dot{n}(t) &= \frac{\rho - \beta}{\Lambda} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(t) \\ \dot{C}_i(t) &= \frac{\beta_i}{\Lambda} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot C_i(t)\end{aligned}\quad (1)$$

Donde:

$n(t)$ = potencia.

$\dot{n}(t)$ = derivada temporal de la potencia.

$C_i(t)$ = concentración del precursor i-ésimo.

$\dot{C}_i(t)$ = derivada temporal de la concentración del precursor i-ésimo.

ρ = reactividad.

β = fracción de neutrones retardados.

β_i = fracción de neutrones retardados del grupo i-ésimo.

Λ = tiempo entre reproducciones.

λ_i = constante de decaimiento del precursor i-ésimo.

Expresando la reactividad en dólares y definiendo:

$b_i = \frac{\beta_i}{\beta}$ Fracciones relativas de neutrones retardados.

$\Lambda^* = \frac{\Lambda}{\beta}$ Tiempo reducido entre reproducciones.

Queda:

$$\begin{aligned}\dot{n}(t) &= \frac{\rho - 1}{\Lambda^*} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(t) \\ \dot{C}_i(t) &= \frac{b_i}{\Lambda^*} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot C_i(t)\end{aligned}\quad (2)$$

1.3 Determinación de las condiciones iniciales

Ahora se determinan las condiciones iniciales suponiendo un reactor estacionario sin fuente de neutrones. Para ello se igualan a cero las derivadas temporales de la potencia y las concentraciones de precursores:

$$0 = \frac{\beta - 1}{\Lambda^*} \cdot n(0) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(0) \quad (3)$$

$$0 = \frac{b_i}{\Lambda^*} \cdot n(0) - \lambda_i \cdot C_i(0)$$

Despejando de la segunda ecuación la concentración inicial y haciendo unitaria la potencia inicial ($n(0) = 1$) queda:

$$C_{i(0)} = \frac{b_i}{\lambda_i \cdot \Lambda^*} \quad (4)$$

Se adopta como valor del tiempo reducido entre reproducciones $\Lambda^* = 0,0125$ seg.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las fracciones relativas de neutrones retardados (b_i) y las constantes de decaimiento (λ_i) según Tuttle. Ver bibliografía (1) y (2).

Tabla 1.

Grupo de precursores	b_i	λ_i
1	0,033	0,0124
2	0,219	0,0305
3	0,196	0,1110
4	0,395	0,3010
5	0,115	1,1400
6	0,042	3,0100

Reemplazando estos valores para los seis grupos en la ecuación (4) se tiene:

$$C_{1(0)} = \frac{b_1}{\lambda_1 \cdot \Lambda^*} = \frac{0,033}{0,0124 \cdot 0,0125} = 212,90322580645161290322580645161 \quad (5)$$

$$C_{2(0)} = \frac{b_2}{\lambda_2 \cdot \Lambda^*} = \frac{0,219}{0,0305 \cdot 0,0125} = 574,42622950819672131147540983607 \quad (6)$$

$$C_{3(0)} = \frac{b_3}{\lambda_3 \cdot \Lambda^*} = \frac{0,196}{0,1110 \cdot 0,0125} = 141,26126126126126126126126126 \quad (7)$$

$$C_{4(0)} = \frac{b_4}{\lambda_4 \cdot \Lambda^*} = \frac{0,395}{0,3010 \cdot 0,0125} = 104,98338870431893687707641196013 \quad (8)$$

$$C_{5(0)} = \frac{b_5}{\lambda_5 \cdot \Lambda^*} = \frac{0,115}{1,1400 \cdot 0,0125} = 8,0701754385964912280701754385965 \quad (9)$$

$$C_{6(0)} = \frac{b_6}{\lambda_6 \cdot \Lambda^*} = \frac{0,042}{3,0100 \cdot 0,0125} = 1,1162790697674418604651162790698 \quad (10)$$

Se dejan expresadas las concentraciones con la cantidad de cifras significativas. Dado que la resolución de las ecuaciones se realiza en forma numérica, conviene utilizar las concentraciones así expresadas. Se comprobó que truncando a tres

decimales, aparecían fluctuaciones en régimen estacionario, donde la solución debe ser constante.

1.4 Programación en diagramas de bloques en Matlab - Simulink®.

Para resolver las ecuaciones de la cinética puntual se utilizó el software Matlab–Simulink®. El mismo se programa en forma gráfica (diagramas de bloques). El programa permite elegir entre distintos métodos de resolución de ODEs (ecuaciones diferenciales ordinarias) y ajustar el paso de integración manualmente o configurarlo en modo variable, si se elige esta última opción, el programa ajusta el valor del paso de resolución automáticamente de acuerdo a las características de la evolución.

En los esquemas sucesivos se puede apreciar la programación. El bloque en rojo de la izquierda es la entrada de reactividad. Los bloques en naranja centrales son las integrales de los 6 grupos de neutrones retardados (bloque superior) y las integrales de los 9 grupos de fotoneutrones (bloque inferior). El bloque en celeste es la integración de la potencia. Los demás bloques son visualizadores de distintos parámetros como ser potencia, reactividad, periodo, concentraciones, etc.

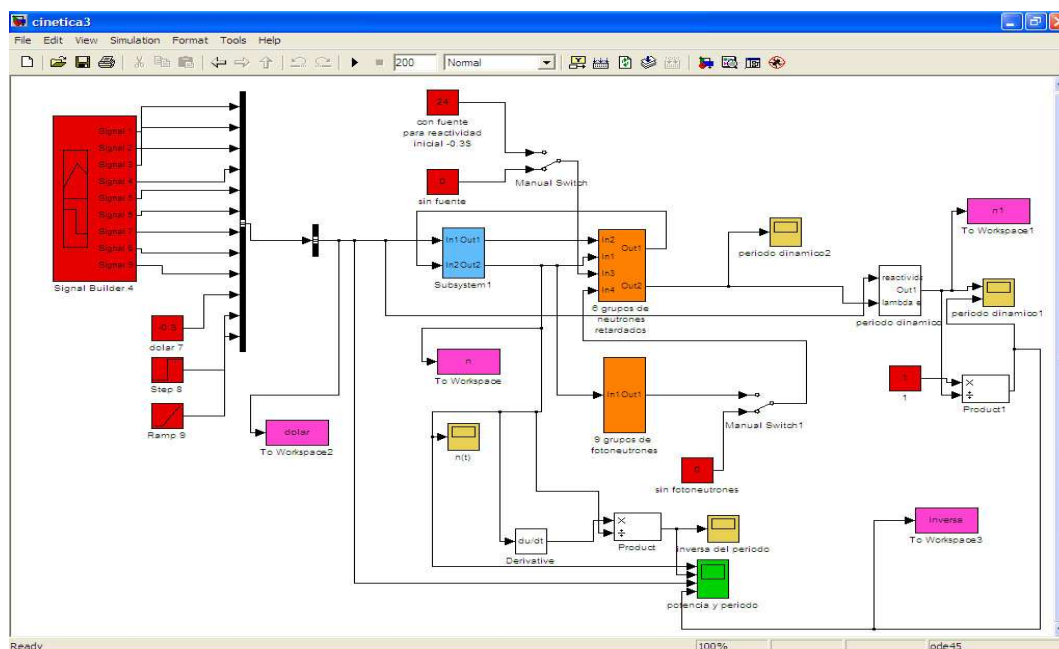


Figura 01. Programación en diagramas de bloques

En la figura 02 se puede ver el bloque de selección de la entrada de reactividad (bloque rojo) abierto. Aquí se pueden generar señales tipo escalón, rampa, senoidal, cuadrada, ruido o definida por el usuario.

El programa permite resolver las ecuaciones eligiendo más de una entrada de reactividad simultáneamente.

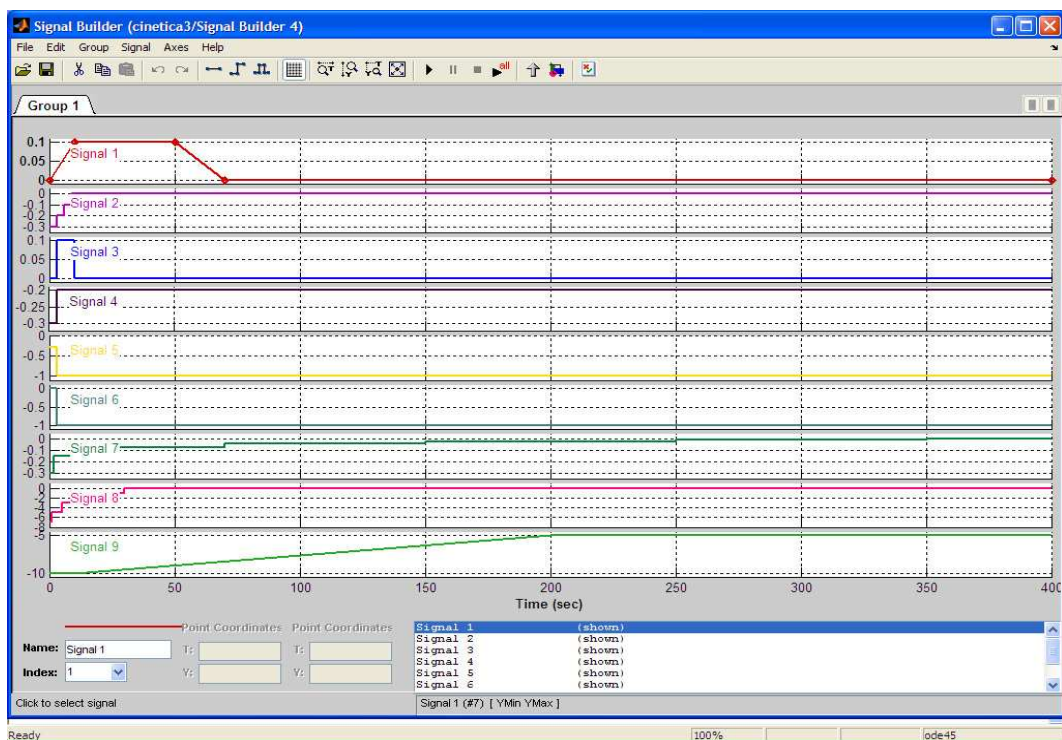


Figura 02. Bloque de entrada de reactividad.

La figura 03 muestra el bloque de integración de la potencia (bloque celeste) abierto.

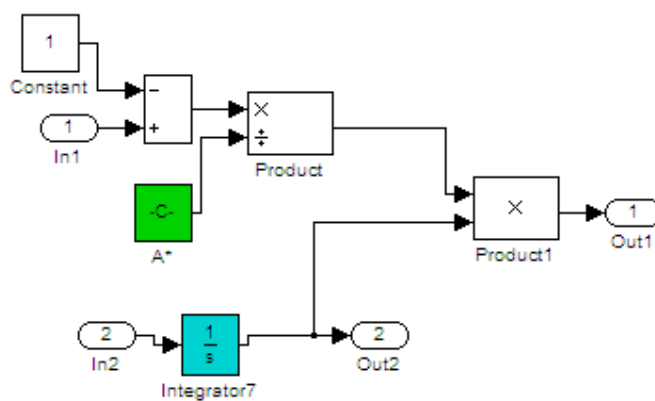


Figura 03. Bloque de integración de la potencia.

La figura 04 es el diagrama del bloque de integración de los 6 grupos de neutrones retardados (bloque naranja superior) abierto, en el mismo se puede ver los 6 subsistemas de integración acoplados.

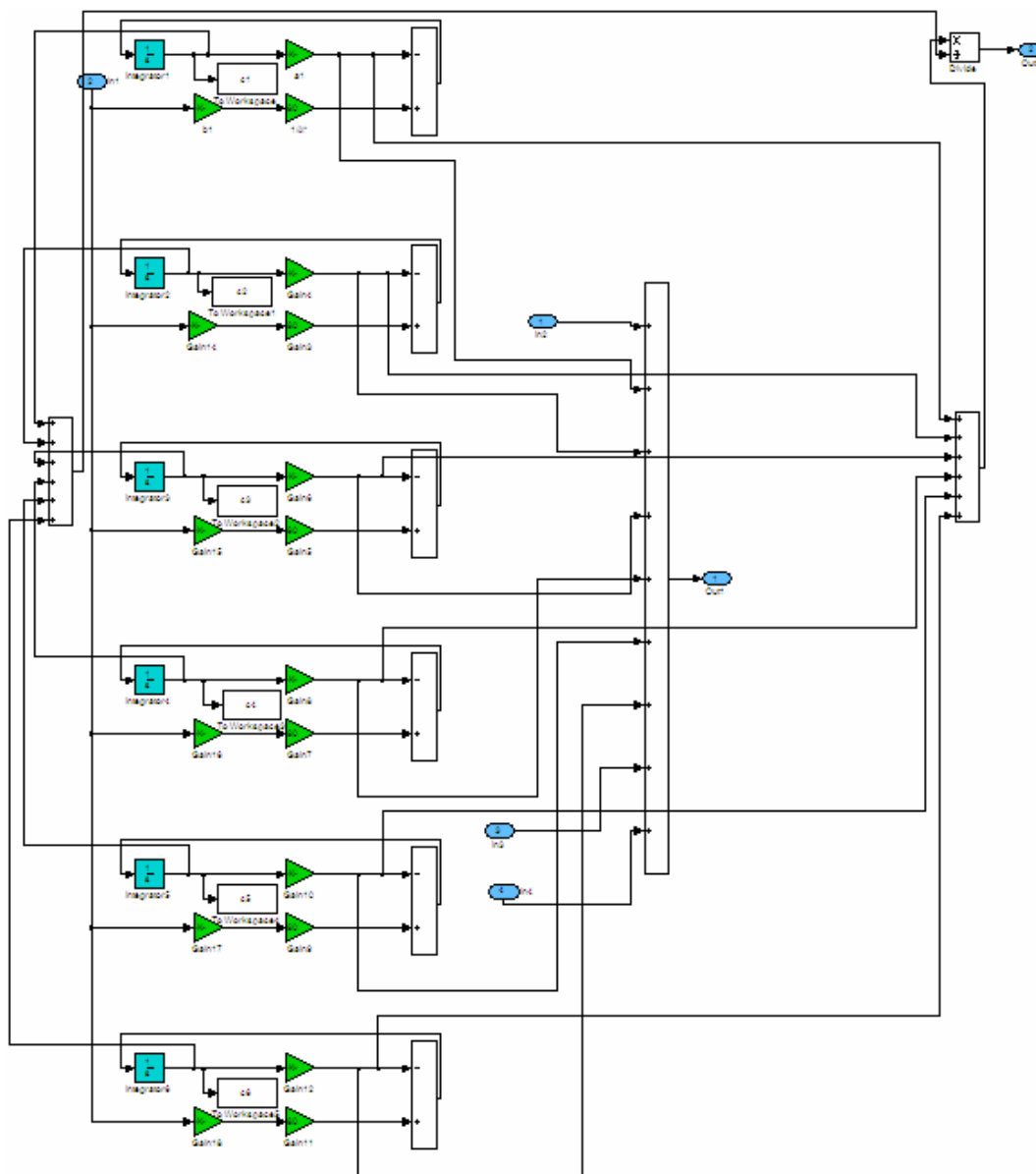


Figura 04. Bloque de integración de los 6 grupos de neutrones retardados.

2.1 Comparación de algunos resultados analíticos y los obtenidos en la simulación.

A continuación se resolverá en forma analítica y numérica algunos casos sencillos con el objetivo de comparar ambas soluciones.

2.2 Agregado de reactividad a un reactor crítico sin fuente.

La solución analítica general de $n(t)$ posterior a un cambio tipo escalón en $t=0$ para un reactor inicialmente crítico y estacionario, tiene la forma:

$$n(t \geq 0) = \sum_{i=1}^7 B_i \cdot e^{\omega_i \cdot t} \quad (11)$$

$$\rho = \Lambda \cdot \omega + \omega \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i + \omega} \quad (12)$$

Donde, fijado el valor de la reactividad (ρ), ω_i y B_i vienen dados por:

$$B_i = \frac{\rho}{\Lambda \cdot \omega + \omega \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \cdot \lambda_i}{(\lambda_i + \omega)^2}} \quad (13)$$

El desarrollo completo de la solución se puede ver en el Anexo II.

2.2.1. Primer caso: agregado de reactividad $\rho = 0.1$ a un reactor crítico sin fuente

Para un agregado de $\rho = 0.1$ de reactividad se obtienen las siguientes respuestas analíticas y numéricas:

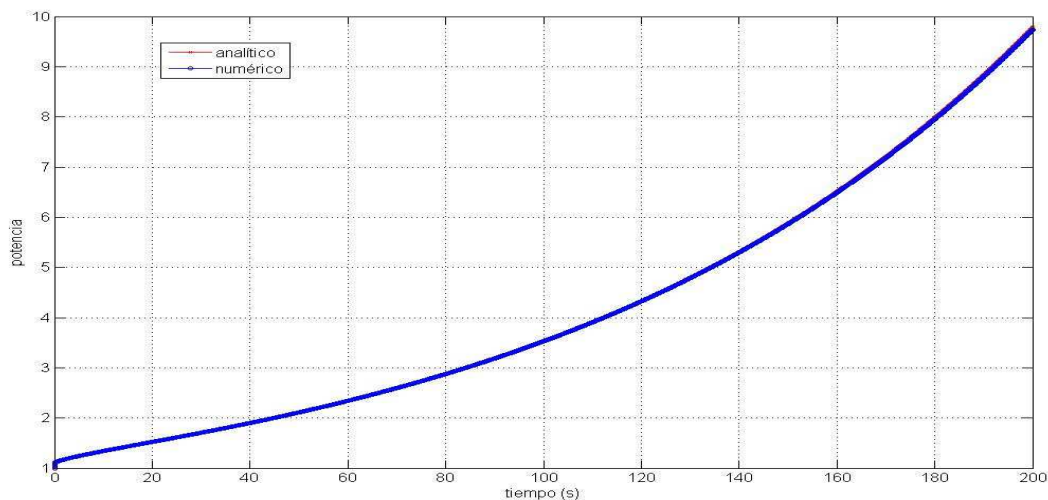


Figura 05. Evolución de la potencia neutrónica.

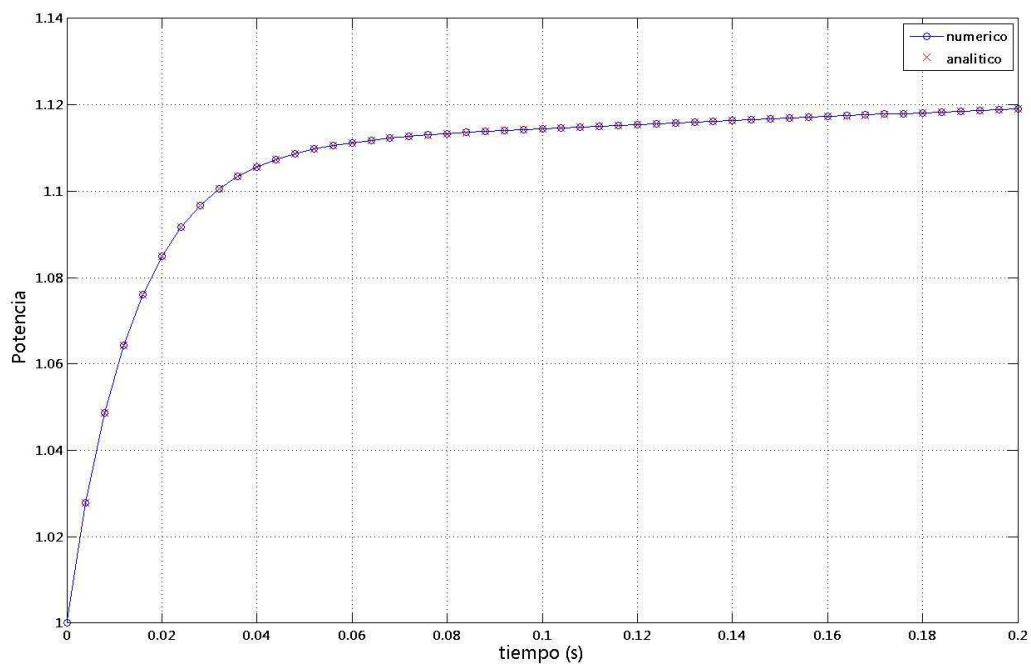


Figura 06. Ampliación en la zona del salto instantáneo.

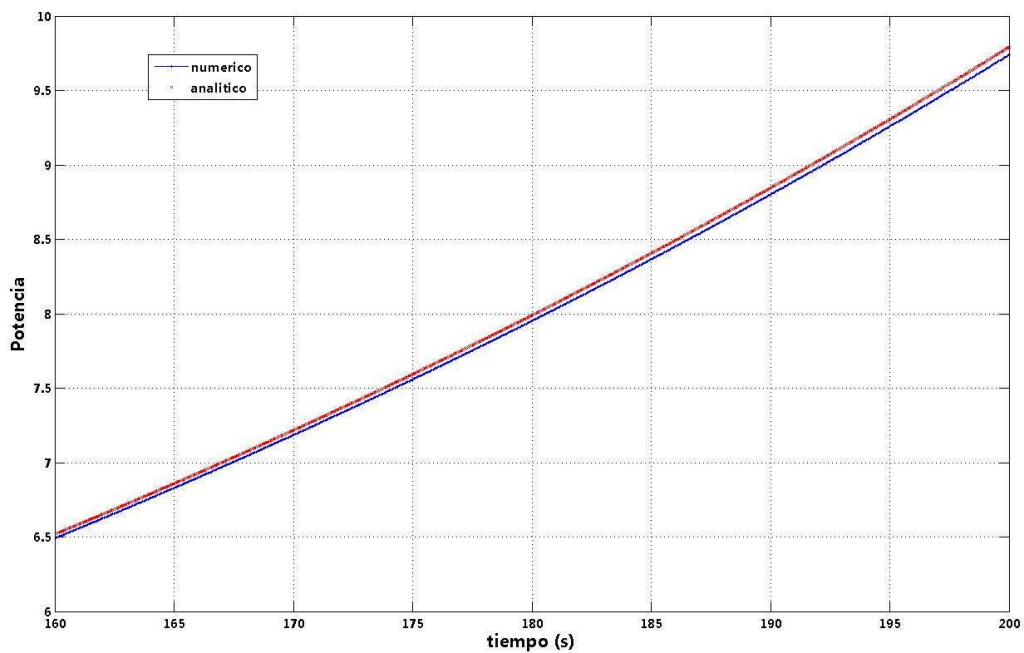


Figura 07. Ampliación en la evolución exponencial.

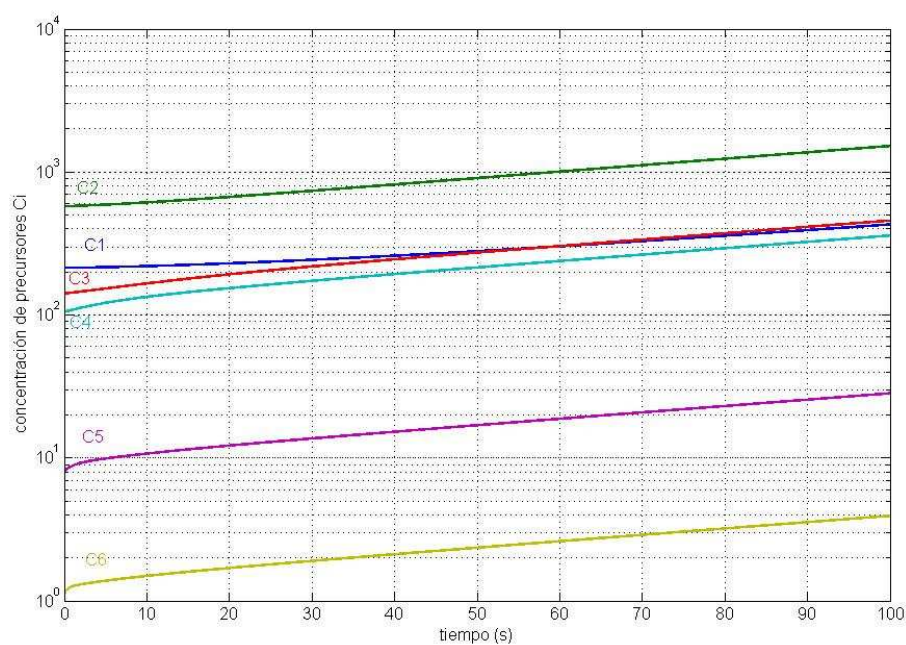


Figura 08. Evolución de la concentración de precursores.

2.2.2 Segundo caso: agregado de reactividad $\beta = -2$ a un reactor crítico sin fuente

Para un agregado de $\beta = -2$ de reactividad se obtienen las siguientes respuestas numéricas y analíticas:

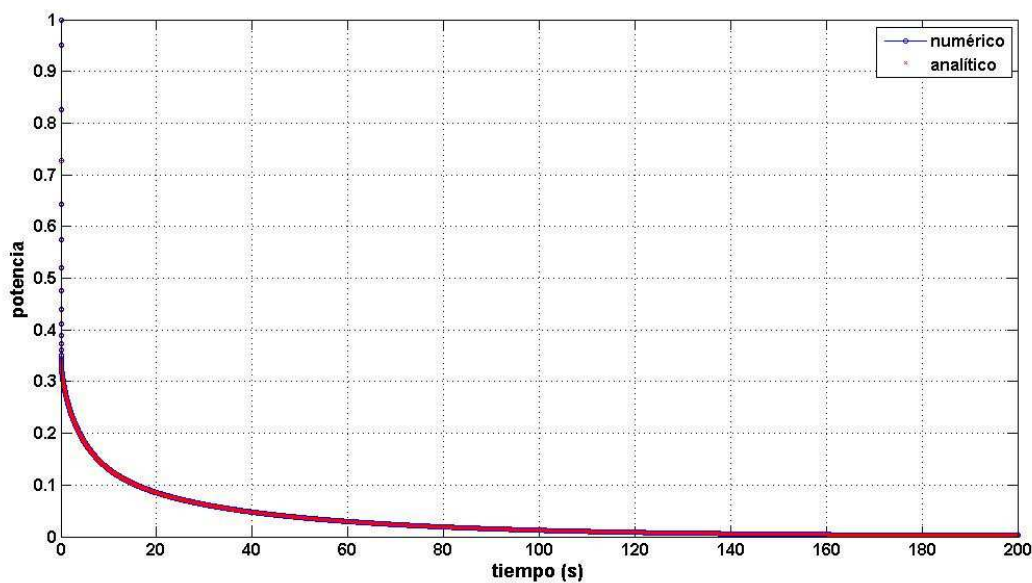


Figura 09. Evolución de la potencia neutrónica.

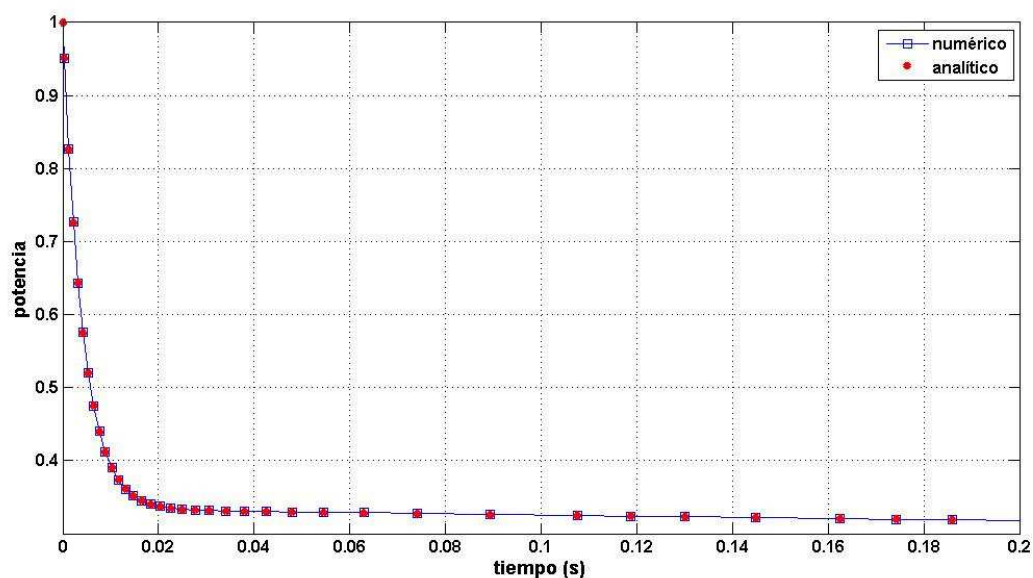


Figura 10. Ampliación en la zona del salto instantáneo.

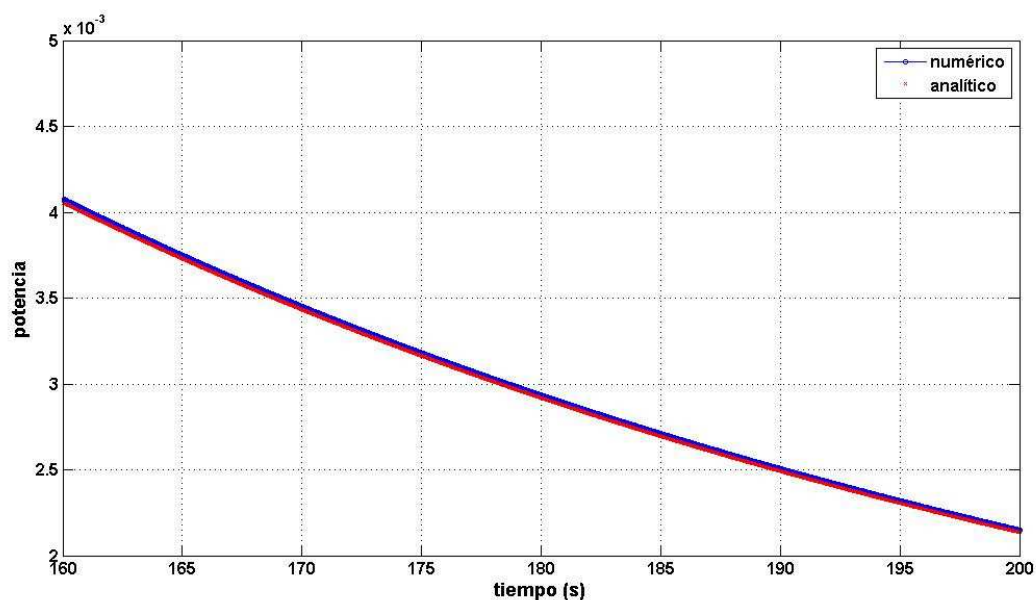


Figura 11. Ampliación en la evolución exponencial.

Se puede comprobar visualmente la correspondencia entre ambas soluciones, tanto para el salto instantáneo como para toda la evolución exponencial aunque en esta última etapa hay una pequeña discrepancia.

En el gráfico siguiente se puede observar la evolución de la concentración de precursores para los 6 grupos.

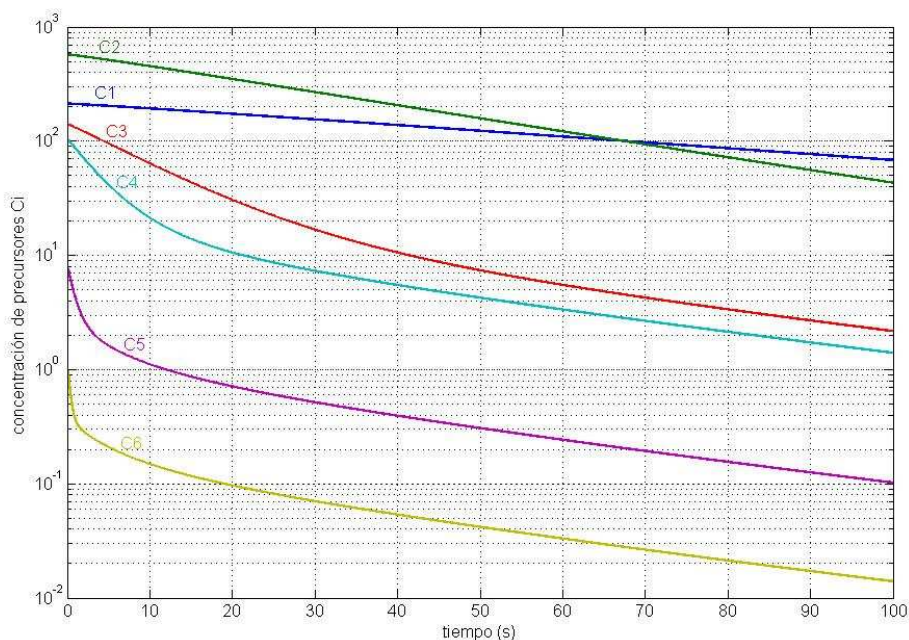


Figura 12. Evolución de la concentración de precursores.

2.3 Salto instantáneo.

Resolviendo la ecuación in-hour a un grupo de neutrones retardados se obtiene la ecuación 1, la cual nos proporciona la evolución de la potencia neutrónica en el tiempo.

$$\frac{n(t)}{n_0} = \frac{\rho}{\rho - \beta} \cdot e^{\left(\frac{\rho - \beta}{\Lambda} t\right)} - \frac{\beta}{\rho - \beta} \cdot e^{\left(-\frac{\rho \lambda}{\rho - \beta} t\right)} \quad (14)$$

El segundo término de esta ecuación representa la aproximación del salto instantáneo:

$$\frac{n(t)}{n_0} = \frac{\beta}{\beta - \rho} \cdot e^{\left(-\frac{\rho \lambda}{\rho - \beta} t\right)} \quad (15)$$

De la cual se deduce que la magnitud del salto viene dada por:

$$\frac{n(t)}{n_0} = \frac{\beta}{\beta - \rho} \quad (16)$$

Expresando la reactividad en dólares queda:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{1-\$} \quad (17)$$

Para comparar los resultados de esta expresión con los obtenidos de la simulación numérica se eligieron tres reactividades arbitrarias ($\$ = 0,1, 0,2$ y $0,3$) obteniéndose los siguientes valores de potencia:

Para $\$ = 0,1$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{1-0,1} = 1,111 \quad (18)$$

Para $\$ = 0,2$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{1-0,2} = 1,250 \quad (19)$$

Para $\$ = 0,3$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{1-0,3} = 1,428 \quad (20)$$

En la figura 13 se simuló numéricamente la respuesta de la potencia para tres agregados de reactividad tipo escalón ($\$ = 0,1, 0,2$ y $0,3$).

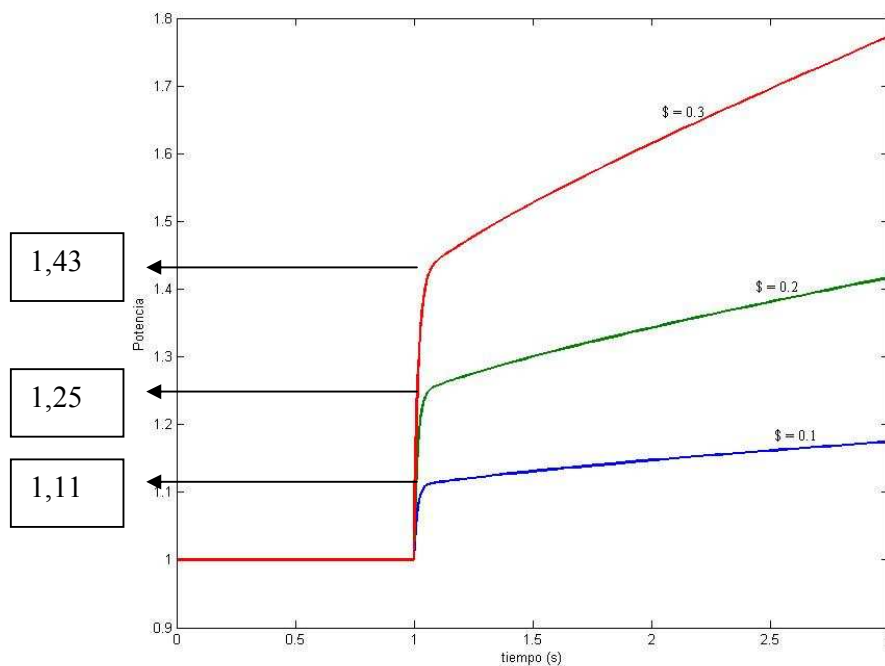


Figura 13. Simulación numérica para tres agregados tipo escalón de reactividad.

En el mismo se marcaron aproximadamente las magnitudes del salto instantáneo de la potencia para las tres curvas. Cabe notar que los resultados numéricos coinciden con las soluciones analíticas previamente obtenidas.

A continuación se ofrecen los tres gráficos de las evoluciones en forma separada y ampliados a una escala temporal de 10 segundos.

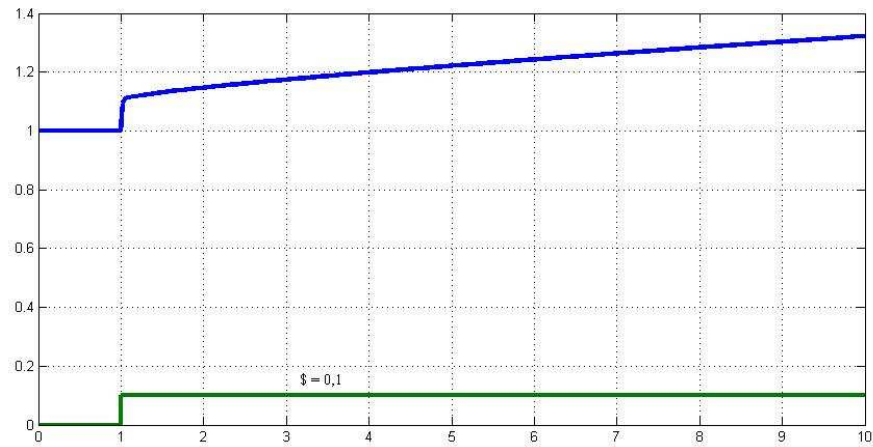


Figura 14. Evolución de la potencia al agregar un escalón de reactividad de $\beta = 0,1$.

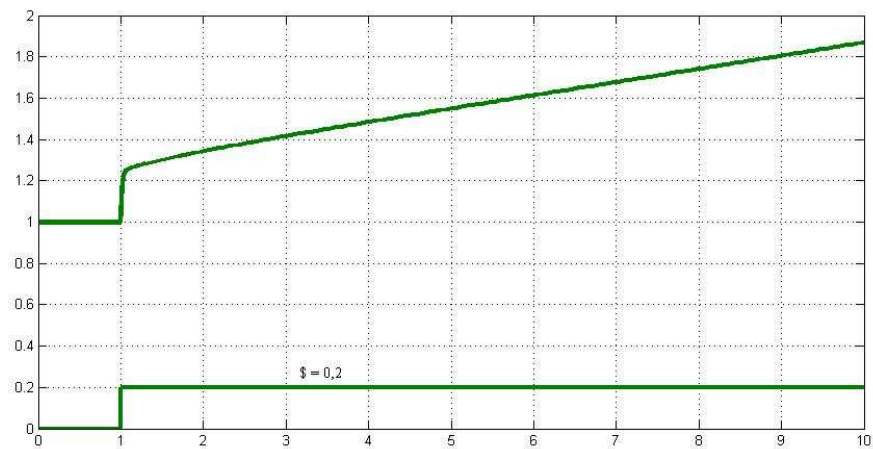


Figura 15. Evolución de la potencia al agregar un escalón de reactividad de $\beta = 0,2$.

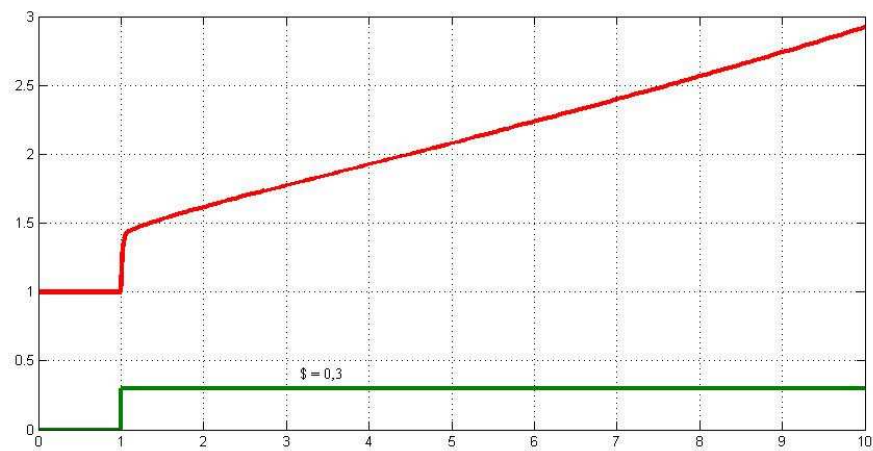


Figura 16. Evolución de la potencia al agregar un escalón de reactividad de $\beta = 0,3$.

Resulta de interés comparar los resultados analíticos y numéricos cuando se agrega reactividad negativa:

Para $\$ = -0,5$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{1 - (-0,5)} = 0,666 \quad (21)$$

Para $\$ = -1$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{1 - (-1)} = 0,5 \quad (22)$$

Para $\$ = -2$

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{1 - (-2)} = 0,333 \quad (23)$$

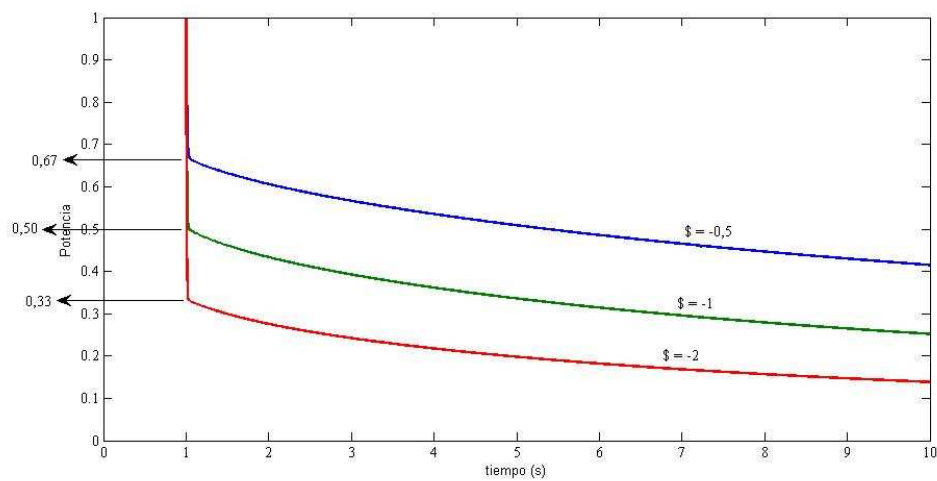


Figura 17. Simulación numérica para tres agregados tipo escalón de reactividad negativa.

Los resultados obtenidos numéricamente coinciden con los analíticos.

2.4 Respuesta de la potencia para distintos agregados de reactividad desde $\$ = 0,1$ hasta 1.

En la figura 18 se pueden observar las respuestas a distintos agregados de reactividad (desde $\$ = 0,1$ hasta $\$ = 1$). Es interesante notar que la reactividad de $\$ = 1$ ($\rho = \beta$) marca un límite de comportamiento del reactor. Para inserciones menores a esta reactividad los tiempos característicos de los neutrones retardados entran en juego, en cambio para reactividades superiores la evolución está gobernada por los tiempos de los neutrones instantáneos. Esto produce aumentos muy grandes de potencia en tiempos muy cortos, lo cual torna ingobernable el reactor. Vale mencionar que si bien $\$ = 1$ es un límite marcado, no puede utilizarse como parámetro de seguridad del reactor. Como se puede ver en los gráficos anteriores un agregado de $\$ = 0,3$ produce un aumento instantáneo de la potencia de un 40 %.

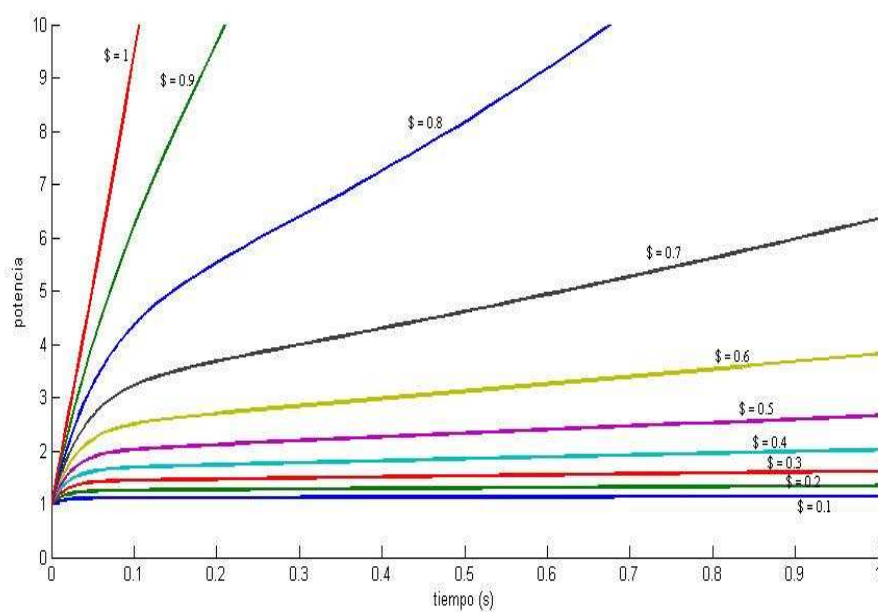


Figura 18. Respuesta de la potencia para diversos agregados de reactividad.

2.5 Respuesta en potencia a distintos agregados de reactividad tipo rampa.

En las figuras siguientes se pueden ver las respuestas de la potencia a distintos valores de rampas de reactividad. Las pendientes de las rampas son respectivamente: 0,1 \$/seg, 0,01 \$/seg y 0,001 \$/seg.

2.5.1 Caso 1: 0,1 \$/seg

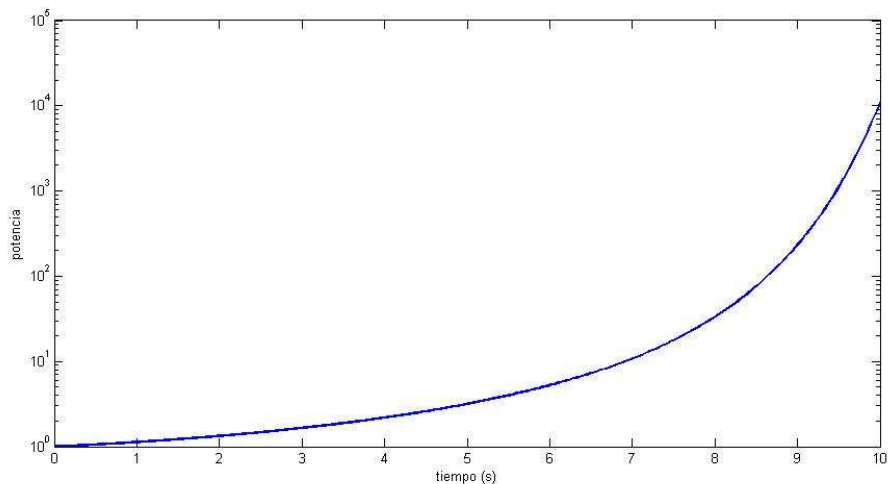


Figura 19. Respuesta de la potencia para una rampa de reactividad de 0,1 \$/seg.

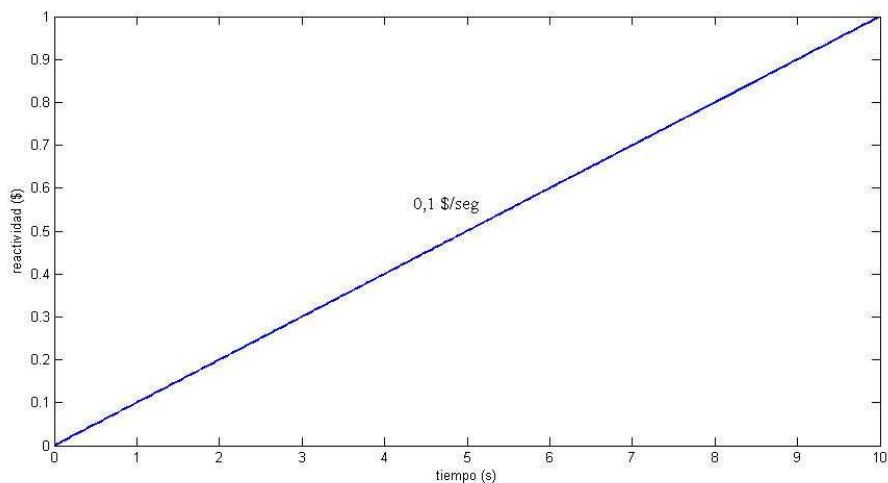


Figura 20. Rampa de reactividad de 0,1 \$/seg.

Para este primer caso hay que notar que la tasa de reactividad agregada es muy alta, en 10 segundos se agregó 1 dólar, con lo cual la potencia alcanzada al cabo de dicho tiempo es de aproximadamente 10^4 . El tiempo de duplicación de la potencia es aproximadamente de 3,7 segundos.

2.5.2 Caso 2: 0,01 \$/seg

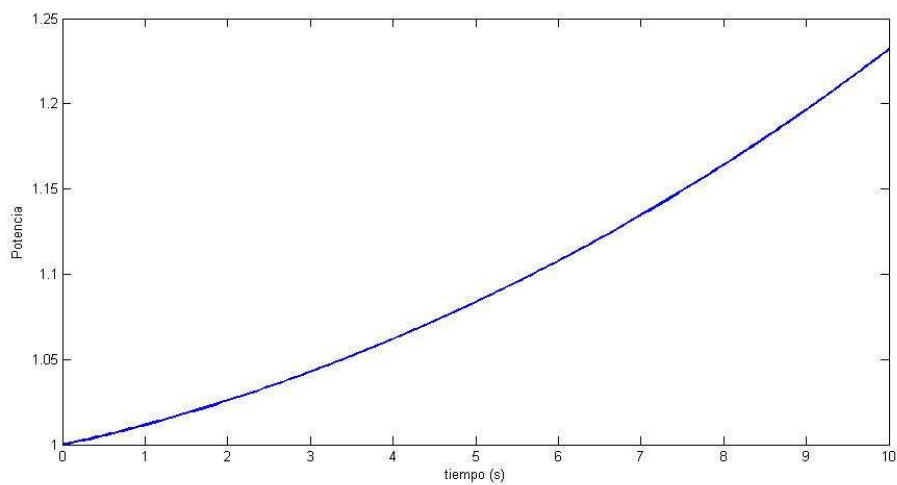


Figura 21. Respuesta de la potencia para una rampa de reactividad de 0,01 \$/seg.

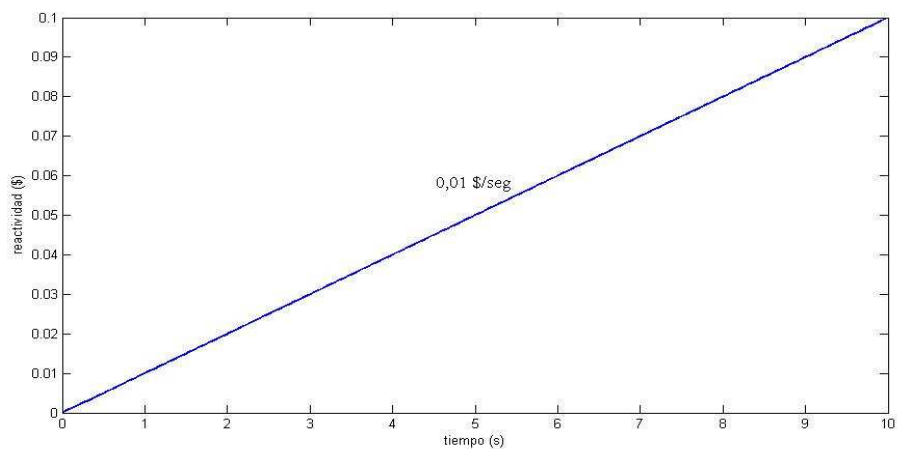


Figura 22. Rampa de reactividad de 0,01 \$/seg.

En este caso se agrega reactividad con una tasa de un orden de magnitud menor, es decir, 0,1 dólar en 10 segundos. Notar que la potencia al cabo de este tiempo es notablemente menor, llegando a 1,23 aproximadamente. El tiempo de duplicación de la potencia en este caso se incrementó a 22 segundos como se ve en la figura siguiente.

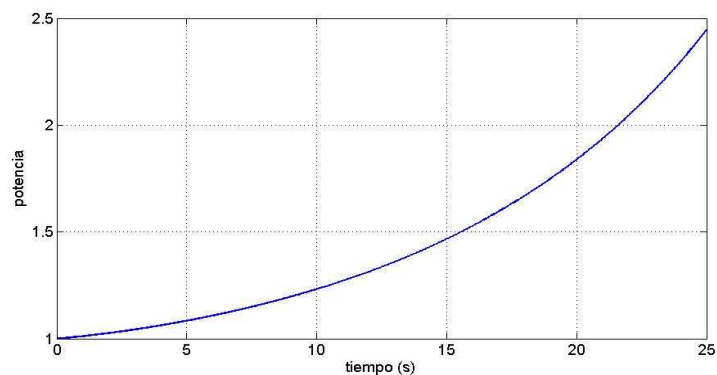


Figura 23. Ampliación de la escala temporal para mostrar el tiempo de duplicación.

2.5.3 Caso 3: 0,001 \$/seg

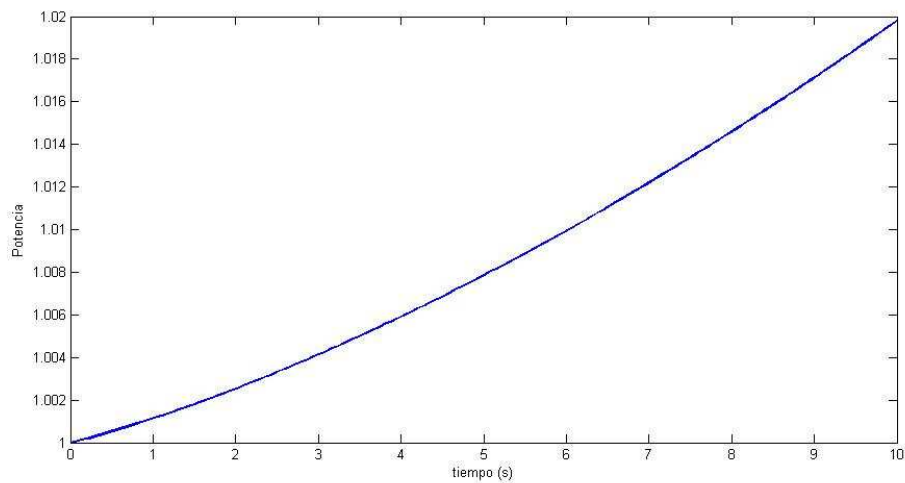


Figura 24. Respuesta de la potencia para una rampa de reactividad de 0,001 \$/seg.

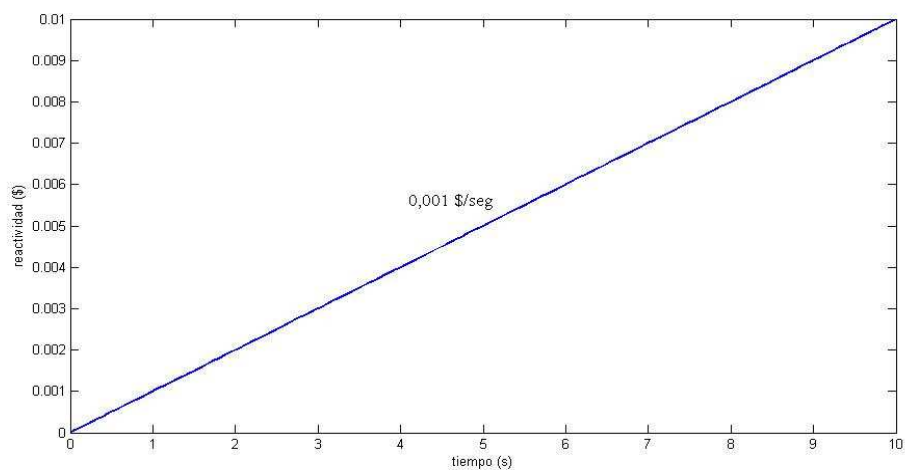


Figura 25. Rampa de reactividad de 0,001 \$/seg.

Aquí la pendiente de reactividad se disminuyó a 0,001 \$/seg. y la potencia cayó a 1,02 al cabo de 10 segundos. El tiempo de duplicación de la potencia en este caso se incrementó a 100 segundos aproximadamente.

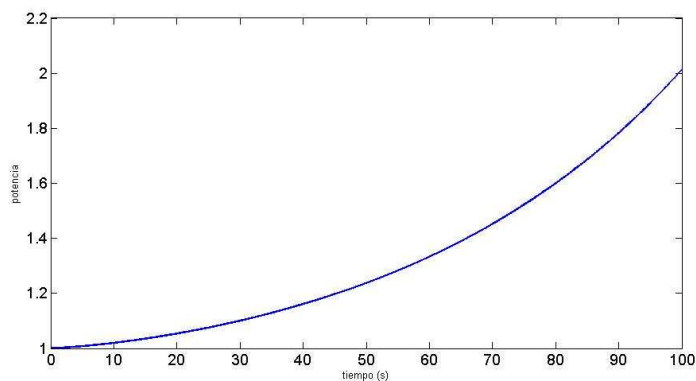


Figura 26. Ampliación de la escala temporal para mostrar el tiempo de duplicación.

2.6 Análisis de la respuesta de la potencia ante una reactividad tipo “rampa(+) / constante / rampa(-)”.

A continuación se analiza la respuesta de la potencia y el periodo para una inserción de reactividad como se puede ver en la figura 27.

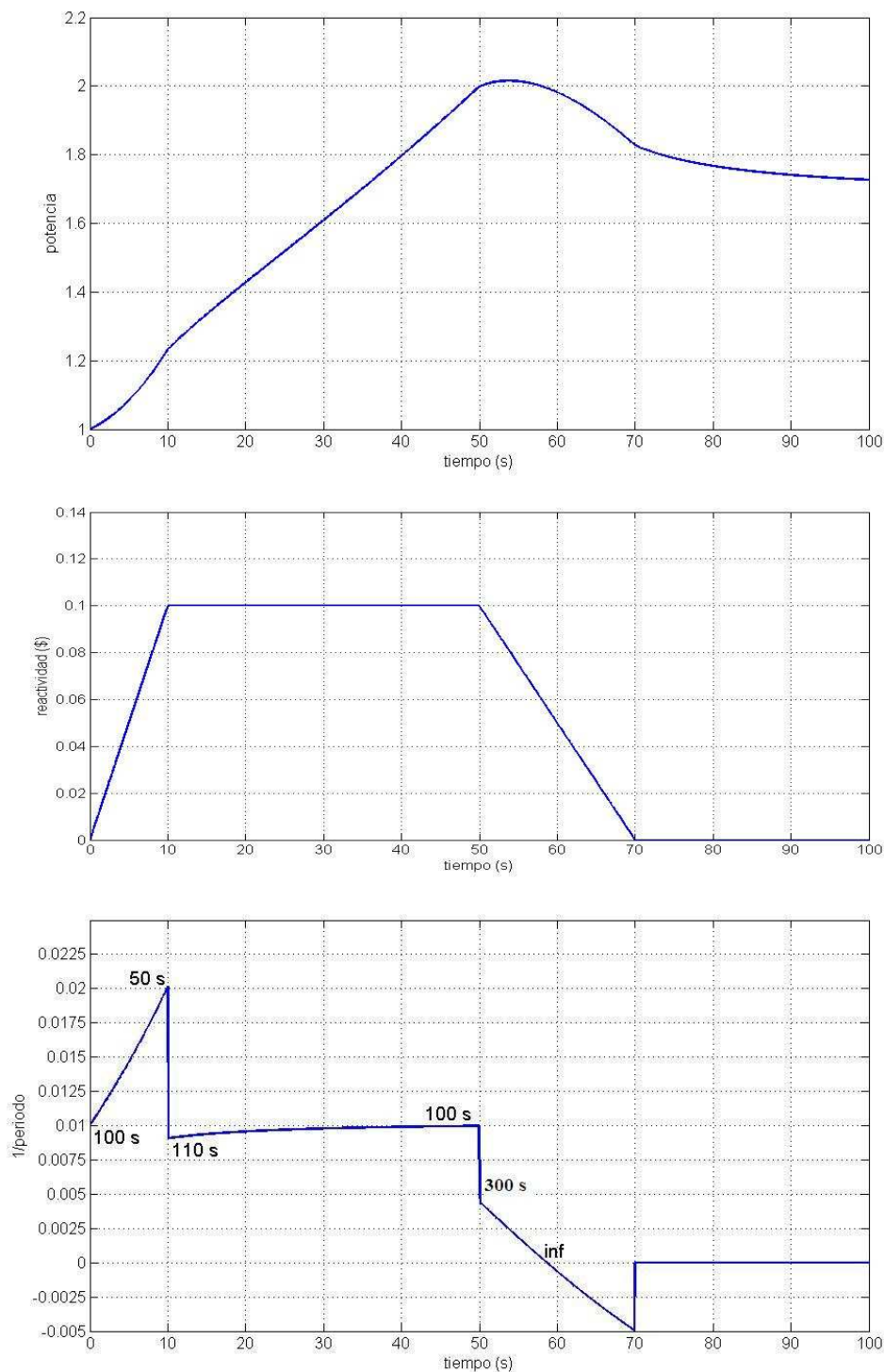


Figura 27. Potencia, reactividad e inversa del período.

La siguiente expresión del periodo fue propuesta por el MIT. Ver bibliografía (4).

$$\tau(t) = \frac{\beta - \rho(t)}{\dot{\rho}(t) + \lambda_e(t) \cdot \rho(t)} \quad (24)$$

Expresando la reactividad en dólares queda:

$$\tau(t) = \frac{1 - \$ (t)}{\dot{\$}(t) + \lambda_e(t) \cdot \$ (t)} \quad (25)$$

- A $t = 0^-$, tanto la reactividad como la tasa de cambio de reactividad son nulas por lo tanto:

$$\tau(0^-) = \frac{1 - \$ (t)}{\dot{\$}(t) + \lambda_e(t) \cdot \$ (t)} = \frac{1 - 0}{0 + 0,08 \cdot 0} = \infty \quad (26)$$

- A $t = 0^+$, la reactividad sigue siendo nula pero la tasa de cambio de la reactividad vale 0,01 dólar/s:

$$\tau(0^+) = \frac{1 - \$ (t)}{\dot{\$}(t) + \lambda_e(t) \cdot \$ (t)} = \frac{1 - 0}{0,01 + 0,08 \cdot 0} = 100s \quad (27)$$

El mero hecho de iniciar una inserción de reactividad lleva inmediatamente al reactor a tener un periodo de 100 segundos.

- A $t = 10^-$, la reactividad vale 0,1 dólar y la tasa de cambio sigue siendo 0,01 dólar/s:

$$\tau(10^-) = \frac{1 - \$ (t)}{\dot{\$}(t) + \lambda_e(t) \cdot \$ (t)} = \frac{1 - 0,1}{0,01 + 0,08 \cdot 0,1} = 50s \quad (28)$$

- A $t = 10^+$, la reactividad se establece en 0,1 dólar y la tasa de cambio es nula:

$$\tau(10^+) = \frac{1 - \$ (t)}{\dot{\$}(t) + \lambda_e(t) \cdot \$ (t)} = \frac{1 - 0,1}{0 + 0,08 \cdot 0,1} = 112,5s \quad (29)$$

- A $t = 50^-$, tanto la reactividad como la tasa de cambio continúan en los mismos valores, por lo tanto el periodo se mantiene constante en 112,5 s desde 10^+ hasta 50^- . Esto quiere decir que la potencia en este periodo aumenta como una exponencial pura.
- A $t = 50^+$, la reactividad sigue en el valor 0,1 dólar pero la tasa de cambio ahora es -0,005 dólar/s,

$$\tau(10^-) = \frac{1 - \beta(t)}{\dot{\beta}(t) + \lambda_e(t) \cdot \beta(t)} = \frac{1 - 0,1}{-0,005 + 0,08 \cdot 0,1} = 300s \quad (30)$$

Una observación de suma importancia es que la potencia aún sigue creciendo aunque se ha insertado reactividad negativa. Este comportamiento es el resultado de que los precursores neutrónicos retardados no han alcanzado todavía un equilibrio para el actual nivel de potencia. Esta es una de las razones por las cuales los operadores requieren habilidad y experiencia para previsualizar esta situación.

$$\tau(55) = \frac{1 - \beta(t)}{\dot{\beta}(t) + \lambda_e(t) \cdot \beta(t)} = \frac{1 - 0,07}{-0,005 + 0,08 \cdot 0,07} = 1550s \quad (31)$$

Análisis de la respuesta de la potencia

- a) A $t = 0$, se comienza a extraer reactividad (o agregar reactividad positiva) esto causa un salto en el periodo. Este efecto es debido a los neutrones instantáneos. La potencia comienza a aumentar.
- b) Para $0 < t < 10$, mientras la reactividad es agregada, el periodo disminuye gradualmente hasta un mínimo. La potencia aumenta más rápido.
- c) A $t = 10$, se para el agregado de reactividad. El periodo vuelve a aumentar. La potencia continua en aumento pero a una tasa menor y lo comienza a hacer en forma exponencial.
- d) Para $10 < t < 50$, el periodo se mantiene constante. La potencia aumenta exponencialmente.
- e) A $t = 50$, el periodo aumenta ya que se quita reactividad (o se agrega reactividad negativa). La tasa de cambio es negativa ahora. La potencia continua en aumento.
- f) Para $50 < t < 55$, la tasa de inserción de reactividad negativa (neutrones instantáneos decrecientes) es insuficiente para contrarestar la reactividad positiva presente (neutrones retardados crecientes). El periodo aumenta. La potencia sigue aumentando pero a una tasa menor.
- g) A $t = 55$, la tasa de cambio de reactividad negativa balancea la reactividad positiva presente. El periodo tiende a ser infinito. La potencia deja de crecer y es momentáneamente constante.
- h) Para $55 < t < 70$, la tasa de cambio de reactividad negativa es mayor que la reactividad positiva presente. El periodo se torna negativo. La potencia decrece.
- i) Para $t \geq 70$, la reactividad se anula y la tasa de cambio también. El periodo tiende a infinito y la potencia evoluciona constante.

2.7 Reactor subcrítico con fuente.

En los siguientes ejemplos se muestra la respuesta de la potencia de un reactor inicialmente subcrítico con fuente, para distintas inserciones de reactividad.

2.7.1 Caso 1

Reactor subcrítico en $\rho = -0.3$, inserción de $\rho = -0.2$

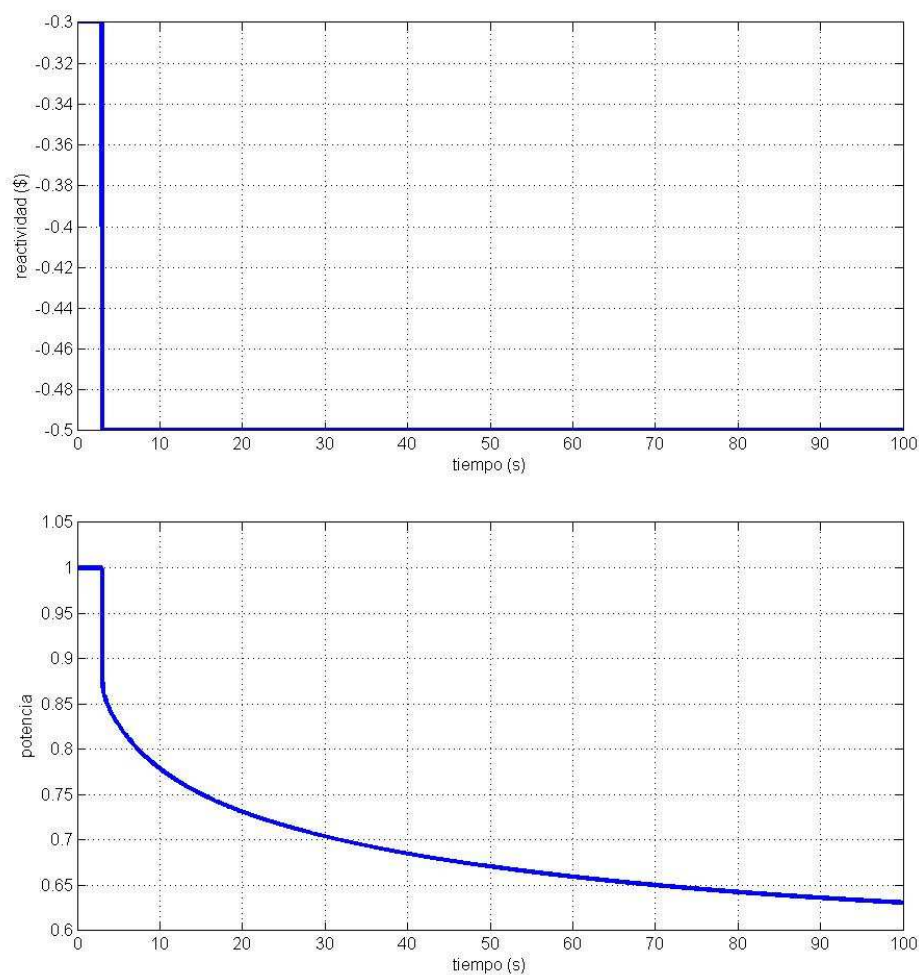


Figura 28. Respuesta de la potencia (inferior) al ingreso de reactividad graficado (superior).

2.7.2 Caso 2

Reactor subcrítico en $\rho = -0.3$, inserción de $\rho = -0.7$

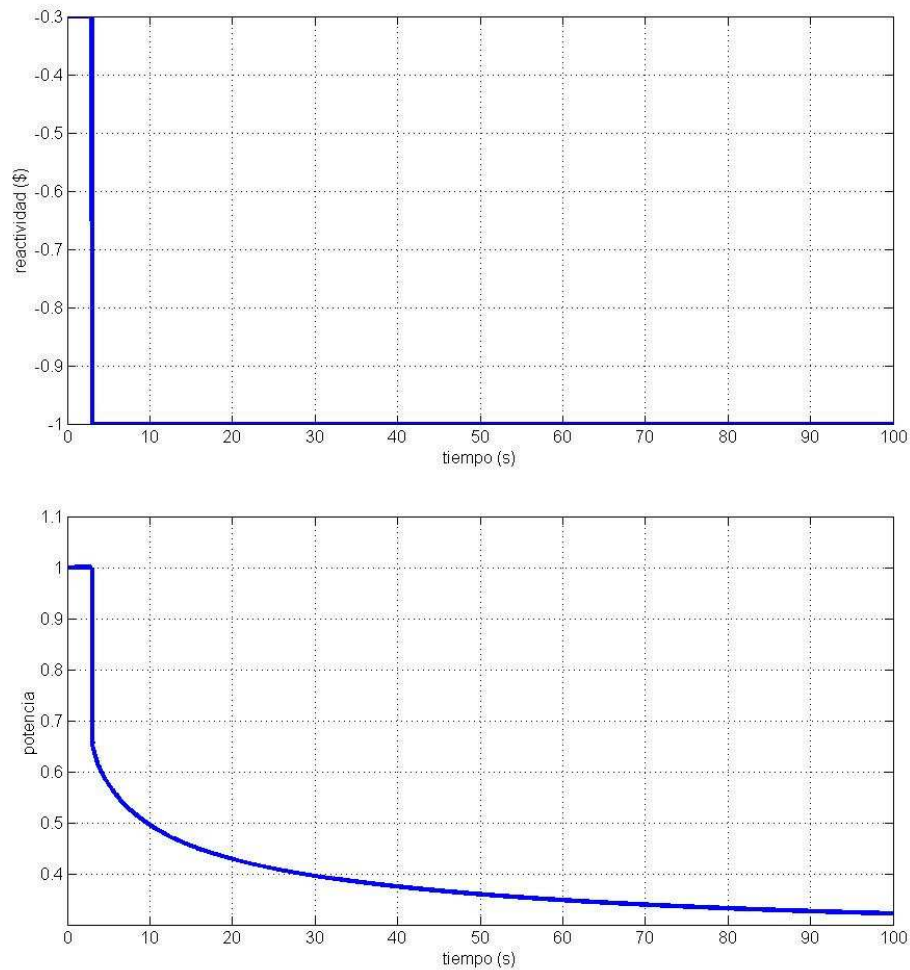


Figura 29. Respuesta de la potencia (inferior) al ingreso de reactividad graficado (superior).

2.7.3 Caso 3

Reactor subcrítico en $\rho = -10$, inserción escalonada de $\rho = 5, 2.5, 1.25$

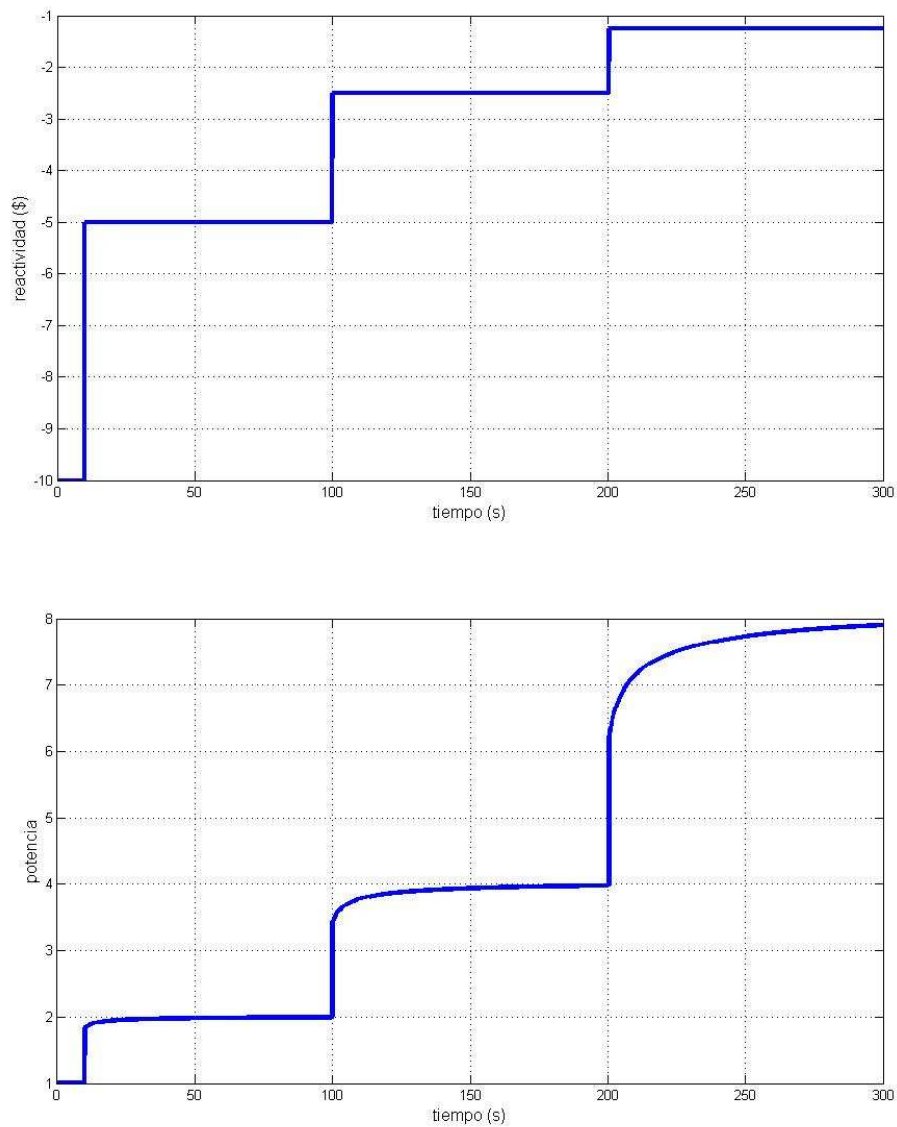


Figura 30. Respuesta de la potencia (inferior) al ingreso de reactividad graficado (superior).

2.7.4 Caso 4

Reactor subcrítico en $\rho = -0.3$, inserción escalonada de $\rho = 0.15, 0.075, 0.0375, 0.01875, 0.009375, 0$.

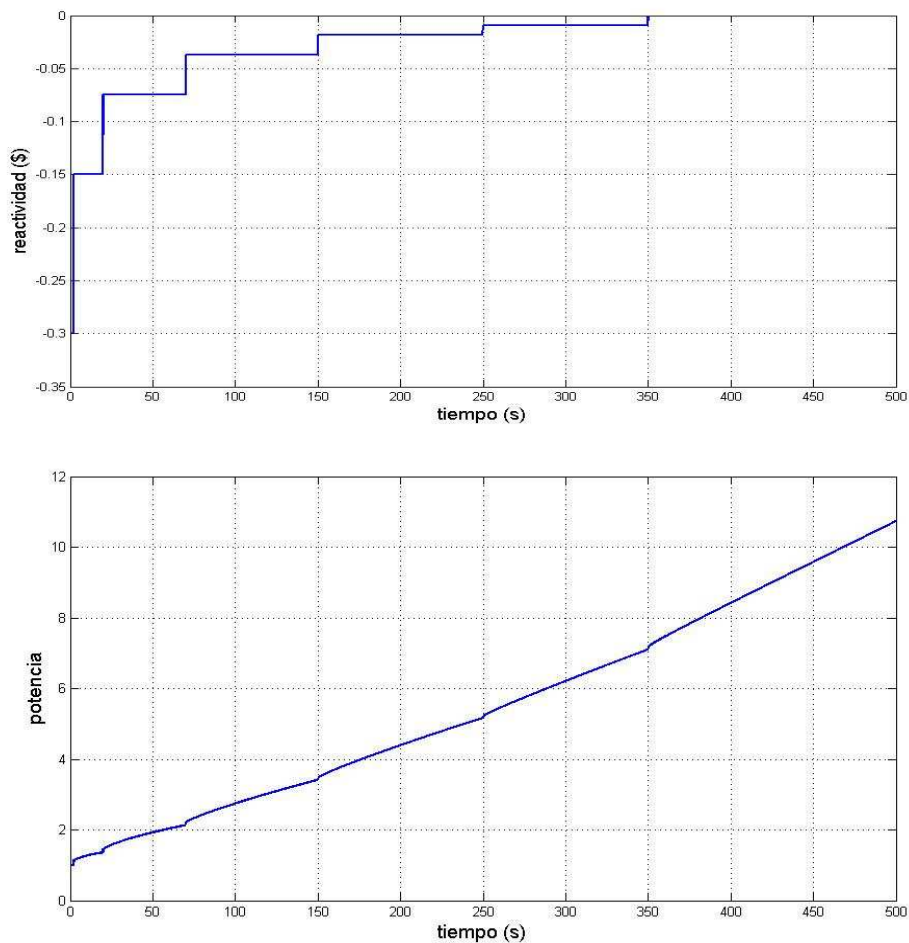


Figura 31. Respuesta de la potencia (inferior) al ingreso de reactividad graficado (superior).

La figura 32 es una ampliación a 80 segundos de la figura 31.

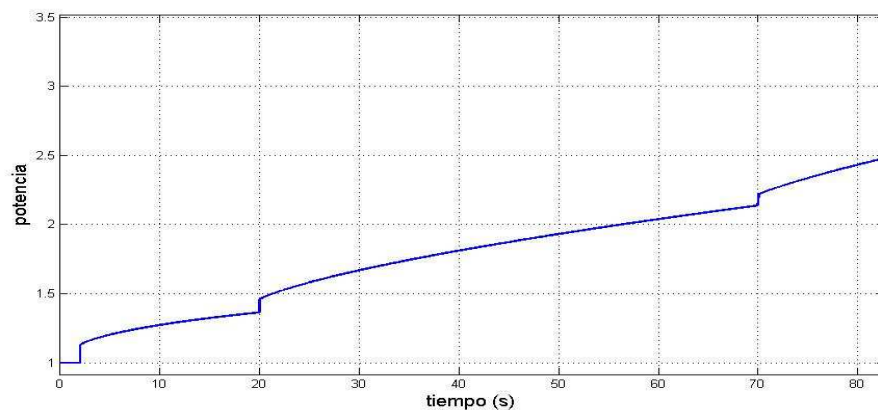


Figura 32. Ampliación a 80 s de la figura 31.

2.8 Análisis de la respuesta de la potencia para una fluctuación periódica de la reactividad tipo senoidal.

Se puede observar en los gráficos siguientes que para dicha excitación la potencia fluctúa en forma senoidal siguiendo la señal de reactividad.

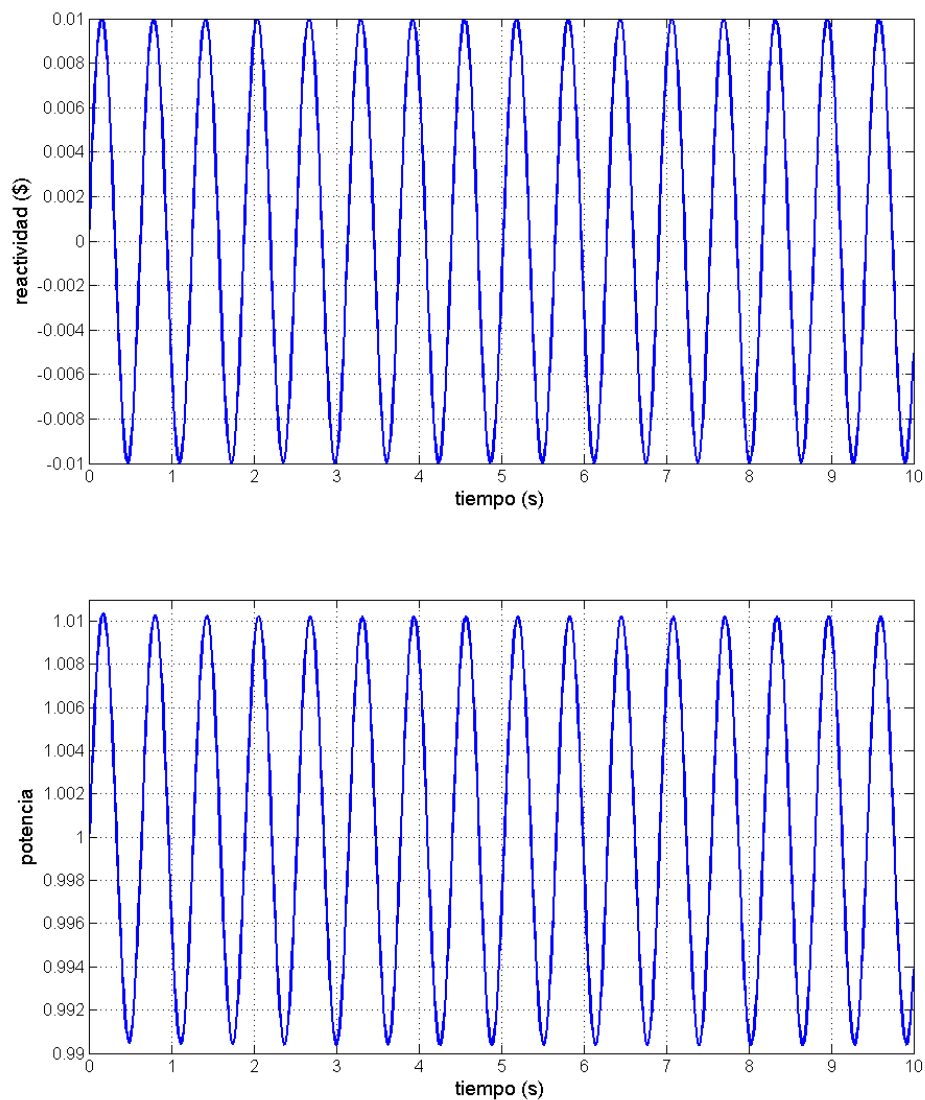


Figura 33. Respuesta de la potencia (inferior) al ingreso de reactividad graficado (superior).

3.1 Fotoneutrones: resolución de la cinética puntual con 6 grupos de neutrones retardados y 9 grupos de fotoneutrones.

Los fotoneutrones son producidos debido a la reacción $D(\gamma, n)H$. Los γ provenientes de los productos de fisión se absorben especialmente en D_2O liberando un neutrón.

La proporción de fotoneutrones respecto de los neutrones retardados depende del reactor en cuestión pero se encuentra comprendida entre 4% y 15%. El campo de fotoneutrones disminuye lentamente (comparado con los neutrones retardados) luego de la parada del reactor, la vida media del último grupo es del orden de los 18 días. Esto es importante y es tenido en cuenta para reiniciar el reactor sin necesidad de fuentes externas.

Si bien la génesis de estos neutrones difiere de la de los neutrones retardados, a efectos prácticos se los agrupa de forma similar, usualmente en 9 grupos de acuerdo a sus vidas medias.

Las ecuaciones de la cinética puntual son similares a las utilizadas anteriormente pero se extienden a 15 grupos totales.

$$\begin{aligned} \dot{n}(t) &= \frac{\rho - \beta}{\Lambda} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^{15} \lambda_i \cdot C_i(t) \\ \dot{C}_i(t) &= \frac{\beta_i}{\Lambda} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot C_i(t) \end{aligned} \quad (32)$$

A continuación se da una tabla de las fracciones relativas y las constantes de decaimiento de los 9 grupos de fotoneutrones. Ver bibliografía (3).

Tabla 2.

Grupo de precursores	b_i	λ_i
7	0.03405	0.2778
8	0.010215	0.01754
9	0.0023297	0.00556
10	0.0019892	0.000926
11	0.0010932	0.0004167
12	0.00028674	0.0001111
13	0.00014337	0.0000441
14	0.00003584	0.00000526
15	0.00003584	0.00000063

El siguiente gráfico compara la evolución de la potencia sin fotoneutrones y con fotoneutrones para una inserción de reactividad de $\rho = -0.3$.

Se puede observar que la potencia con fotoneutrones decae por encima (más lentamente) de la potencia sin fotoneutrones.

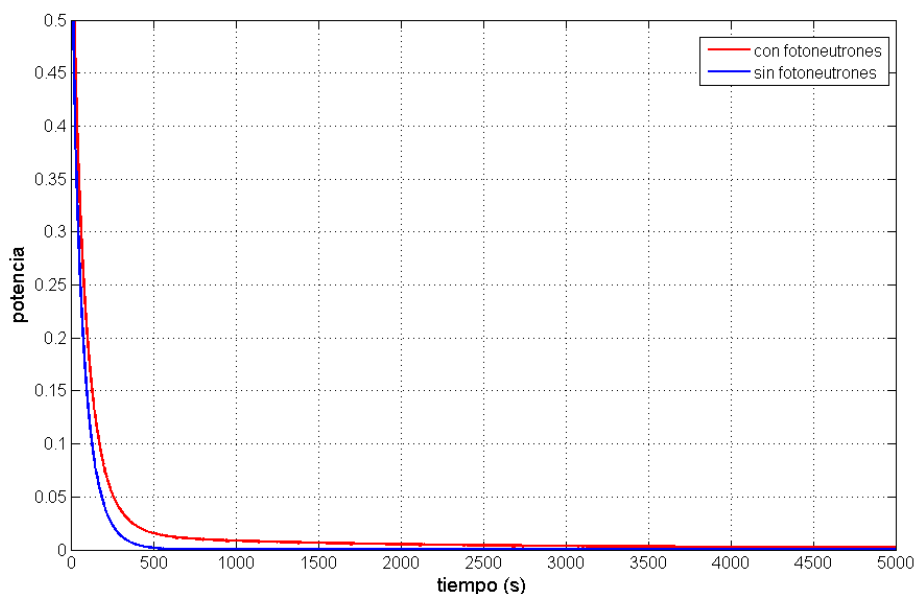


Figura 34. Respuesta de la potencia sin y con fotoneutrones.

4.1 Simulación en tiempo real

A continuación se grafican salidas en tiempo real de los parámetros (tanto la reactividad como la potencia neutrónica). Para ello se utilizó una computadora industrial con una tarjeta de adquisición de datos, la cual proporciona una salida en voltaje proporcional a la densidad neutrónica.

Con esta plataforma en tiempo real servirá como el primer paso para la validación de nuevos sistemas de medición, previamente a la realización de experiencias concretas en un reactor nuclear.

Potencia salida: es la potencia neutrónica simulada y registrada en la PC.

Potencia entrada: es la potencia neutrónica simulada y adquirida por la placa de adquisición como voltaje -10V/10V.

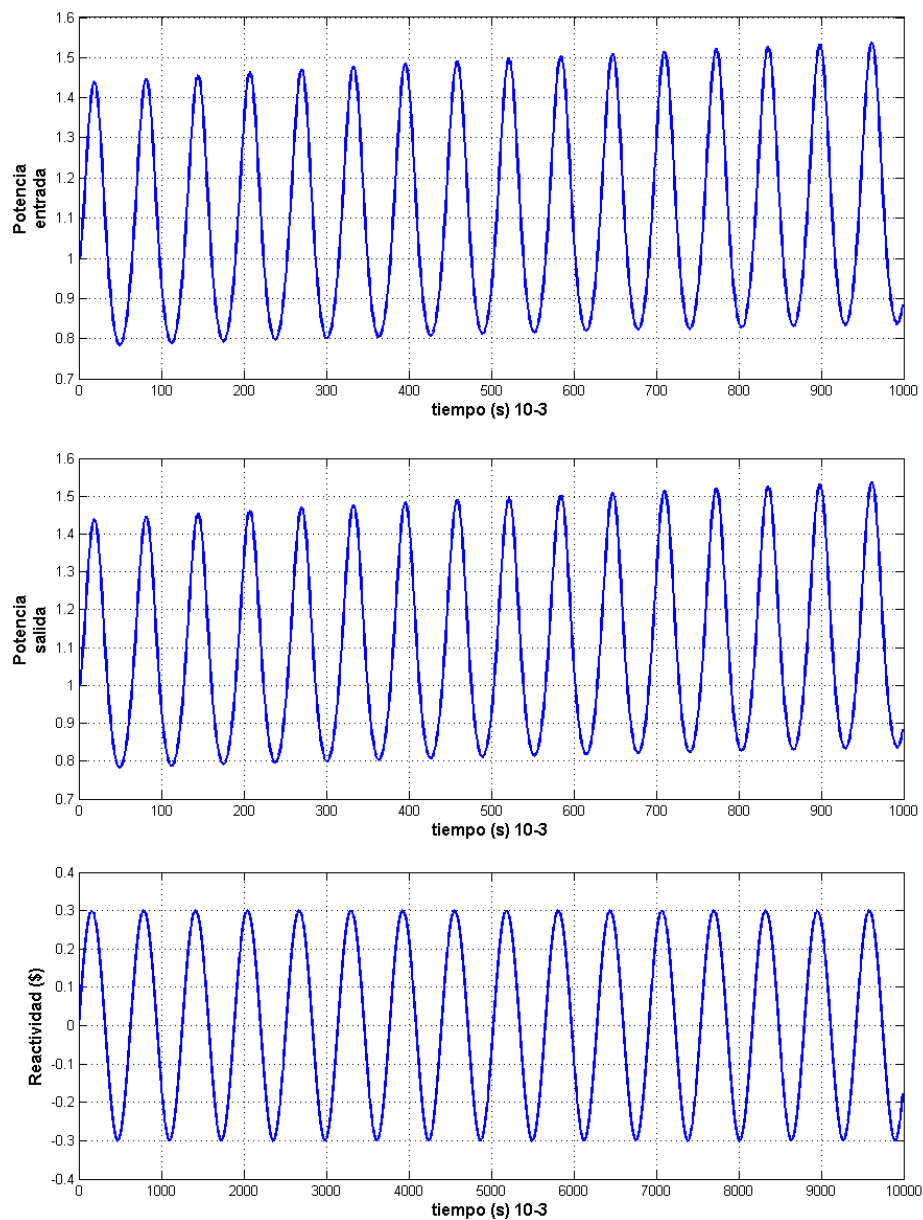


Figura 35. Potencia de entrada, salida y reactividad.

Se puede observar la correspondencia entre lo que genera la PC y lo que registra la placa de adquisición de datos en tiempo real.

En la figura 36 se observan las configuraciones input/output de la placa de adquisición.

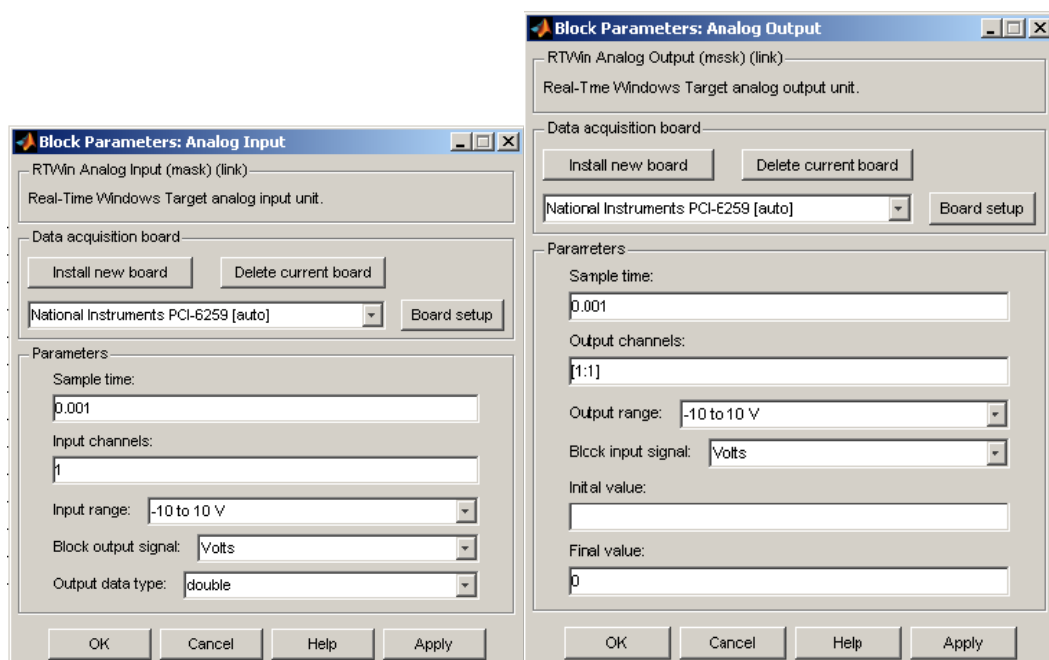


Figura 36. Configuración de los parámetros de la placa de adquisición.

En las figuras 37, 38 y 39 se pretende mostrar en sucesivas ampliaciones el paso de discretización en la adquisición. El tiempo de muestreo es de 0.001 segundos.

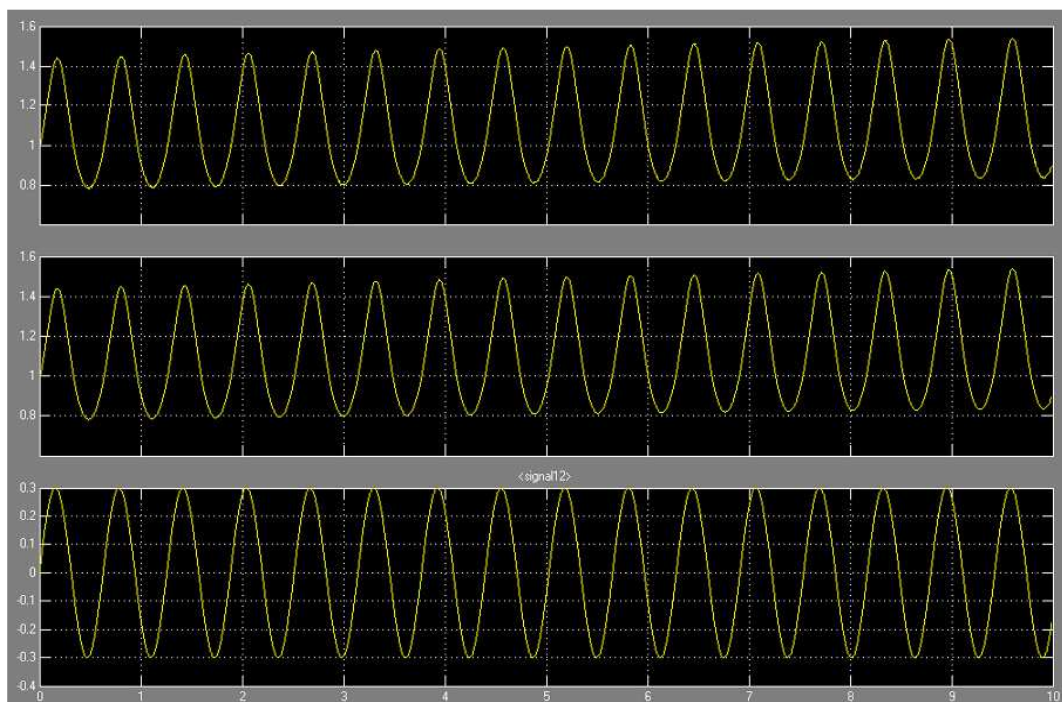


Figura 37. Potencia de entrada, salida y reactividad.

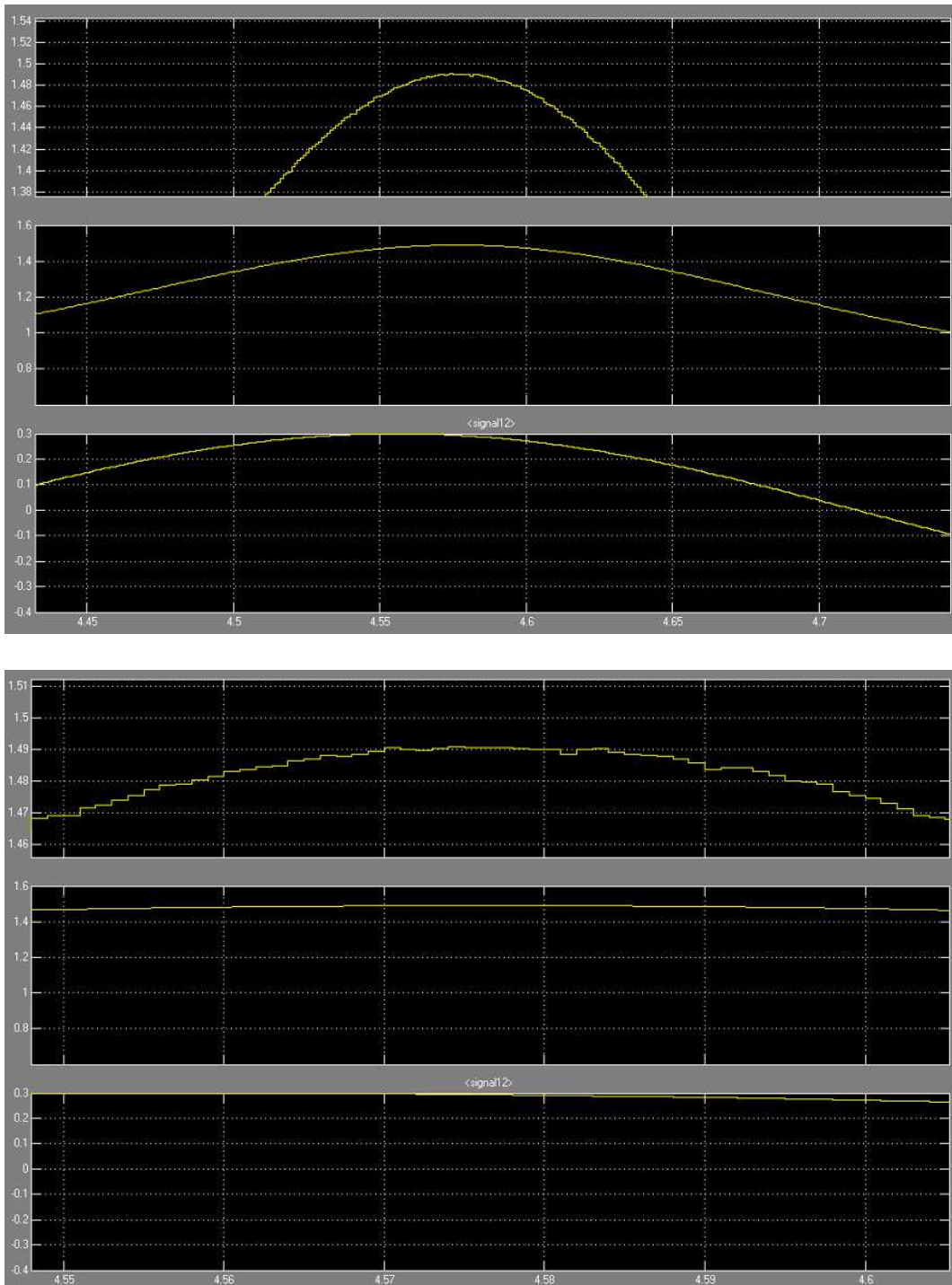


Figura 38. Sucesivas ampliaciones para mostrar la discretización.

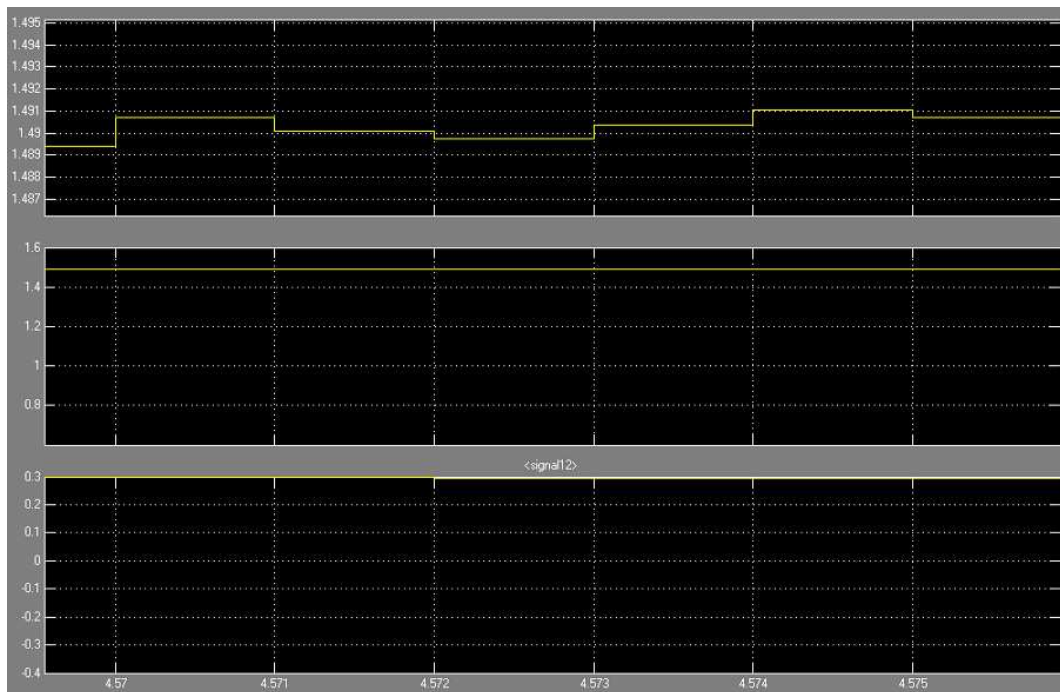


Figura 39. Ampliación mostrando el paso de discretización de 0.001 s.

5.1 Aplicación al Reactor CAREM

El simulador de la neutróica/termohidráulica del reactor CAREM utiliza un modelo simplificado de la cinética puntual a un grupo de neutrones retardados. En las figuras que siguen se podrá ver la respuesta del sistema reemplazando el bloque de neutróica original a un grupo por el modelo a 6 grupos desarrollado en la presente tesis.

En las simulaciones siguientes el reactor se encuentra crítico a 100 MW y se agrega un escalón de reactividad de 100 pcm.

En el Anexo III se detalla el funcionamiento del simulador.

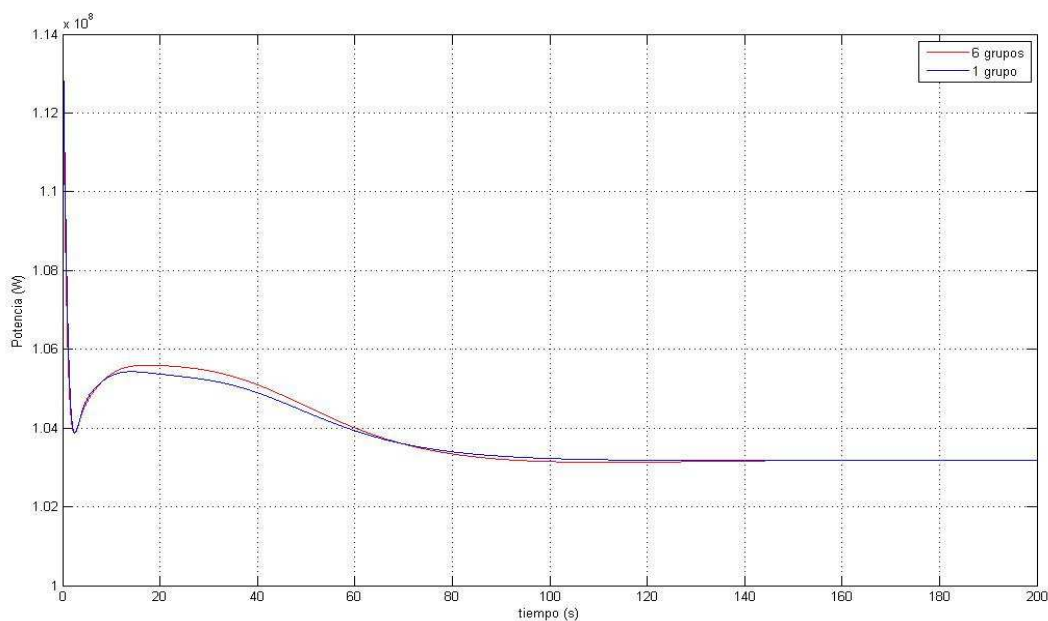


Figura 40. Evolución de la potencia a 6 grupos y a 1 grupo.

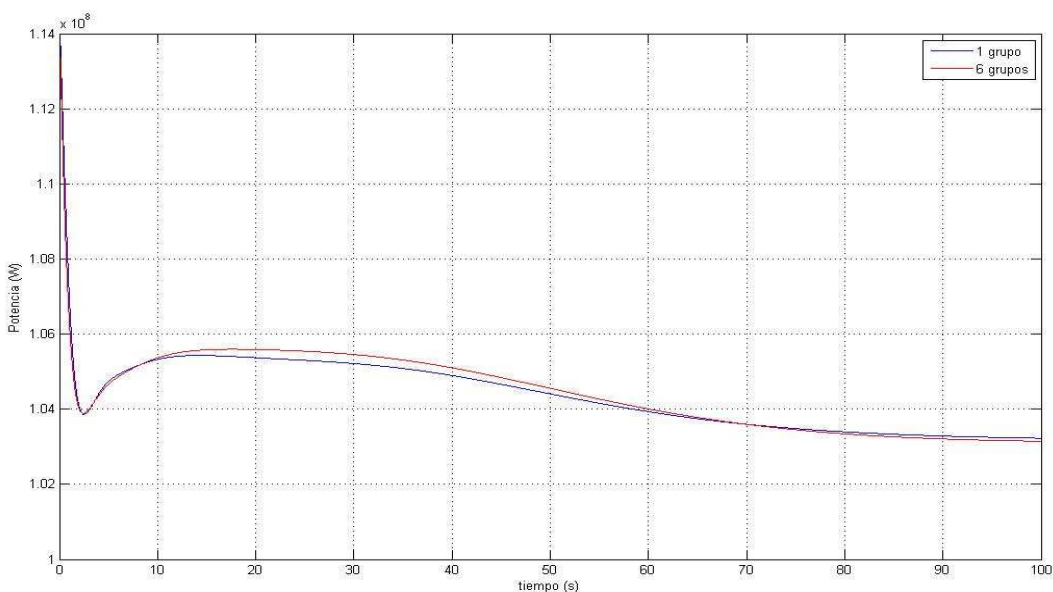


Figura 41. Evolución de la potencia, ampliación a 100 s.

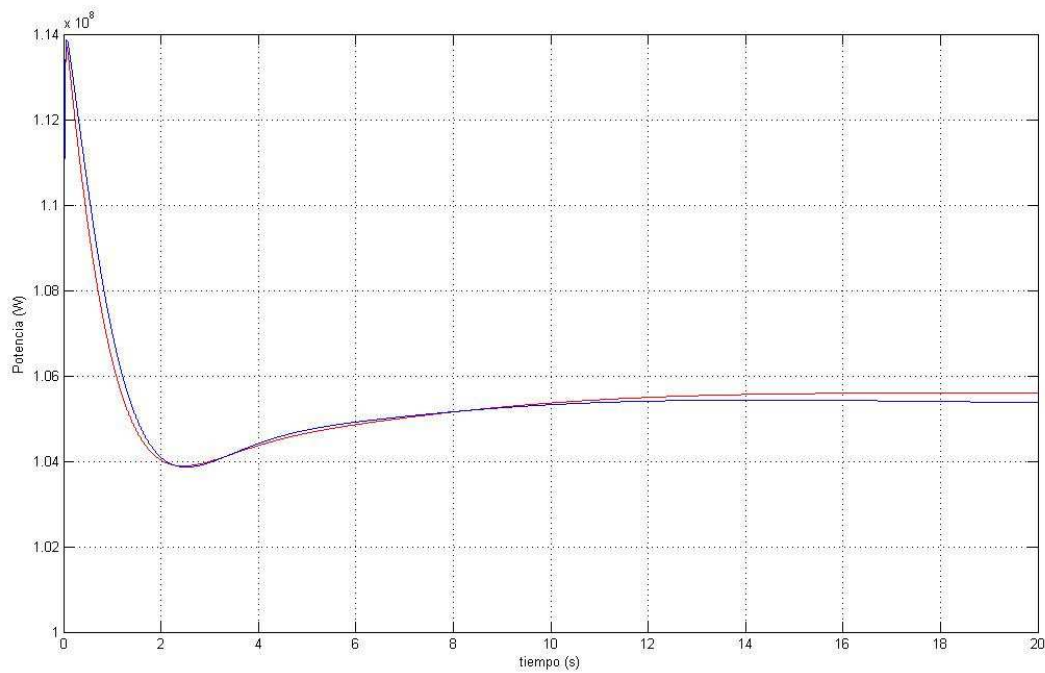


Figura 41. Evolución de la potencia, ampliación a 20 s.

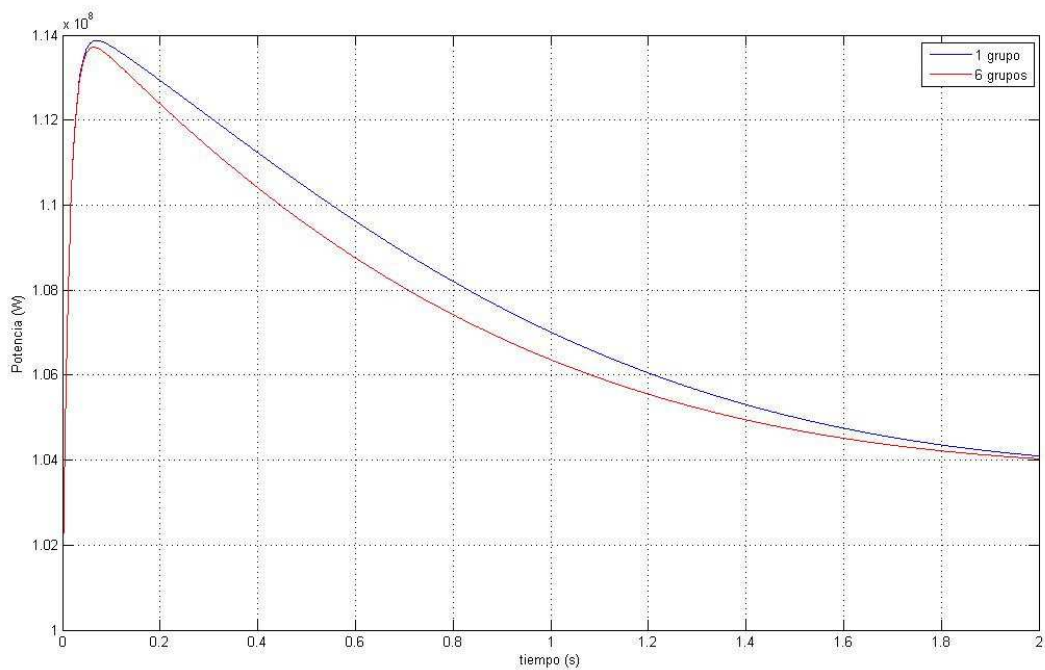


Figura 41. Evolución de la potencia, ampliación a 2 s.

Se puede visualizar la correspondencia entre ambas soluciones. La respuesta de la potencia presenta un pico inicial de aproximadamente 114 MW para luego descender, fluctuar y establecerse en 103 MW a los 120 segundos.

6.1 Conclusiones

Se pudo programar y resolver con éxito las ecuaciones de la cinética puntual, obteniendo como resultado una plataforma muy versátil que permite evaluar la evolución de la potencia neutrónica para diversos agregados de reactividad complejos, así como también la simulación de los fotoneutrones.

Se logró introducir esta programación en el simulador CAREM y comparar las evoluciones de ambos modelos obteniéndose muy buenos resultados.

Finalmente se adquirió en tiempo real la evolución de la potencia en una placa en forma de voltaje y se comparó con la generada correspondiéndose.

Esta plataforma permite seguir trabajando y agregando módulos como por ejemplo la realimentación por temperatura, presión, etc. y el efecto del quemado o los venenos.

ANEXO I

Descripción del método numérico utilizado.

El programa permite elegir entre diversos métodos de resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias. Se optó por trabajar con el muy conocido y tradicional Runge-Kutta de orden 4. A continuación se hace un análisis de la elección del paso de cálculo, obteniéndose como resultado que el método resulta estable y converge a la solución para pasos inferiores a 0,028 segundos.

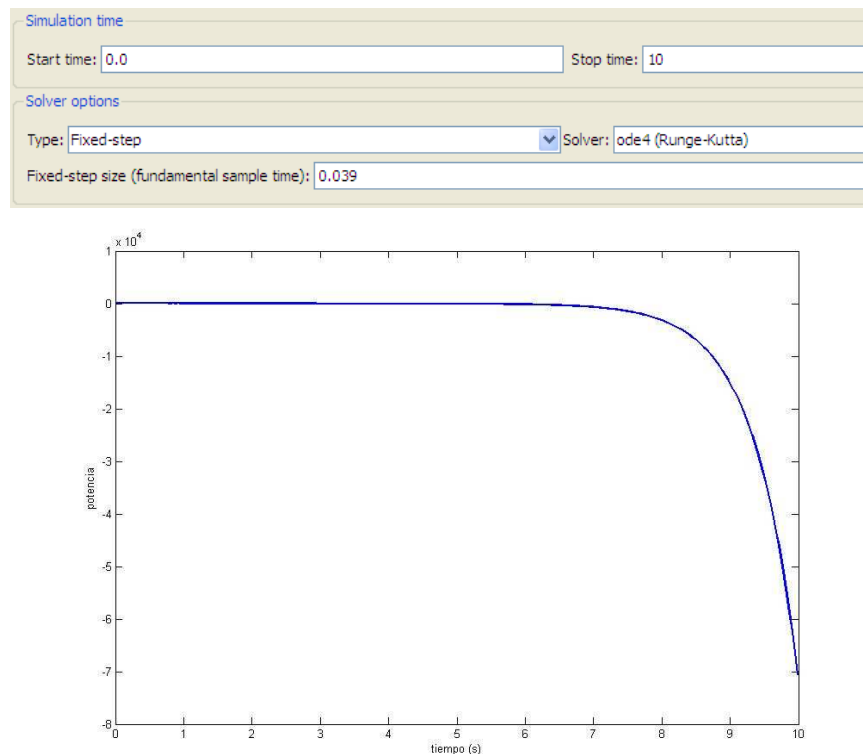
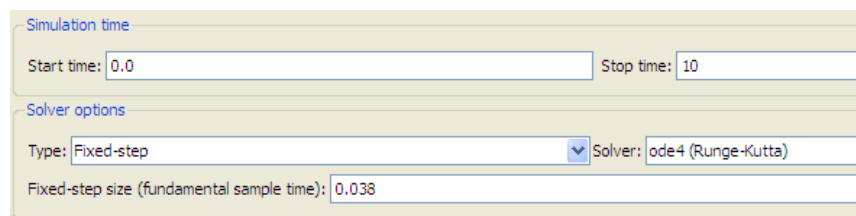


Figura 42. Divergencia de la solución para un paso de 0,039 seg.



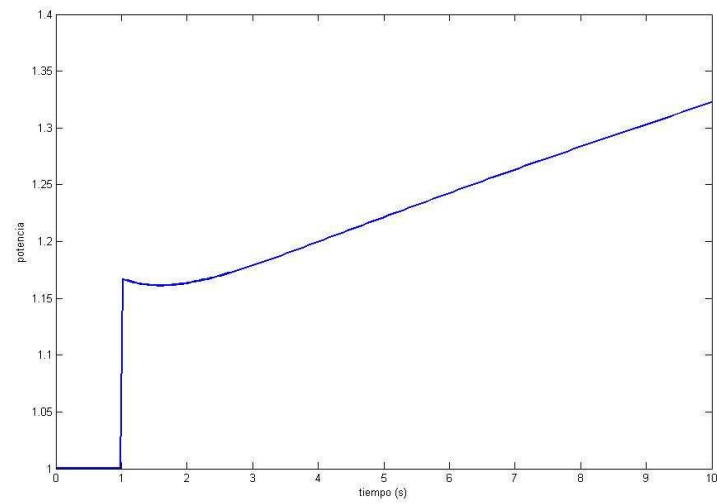


Figura 43. Inestabilidad de la solución para un paso de 0,038 seg.

Simulation time

Start time: 0.0 Stop time: 5

Solver options

Type: Fixed-step Solver: ode4 (Runge-Kutta)

Fixed-step size (fundamental sample time): 0.029

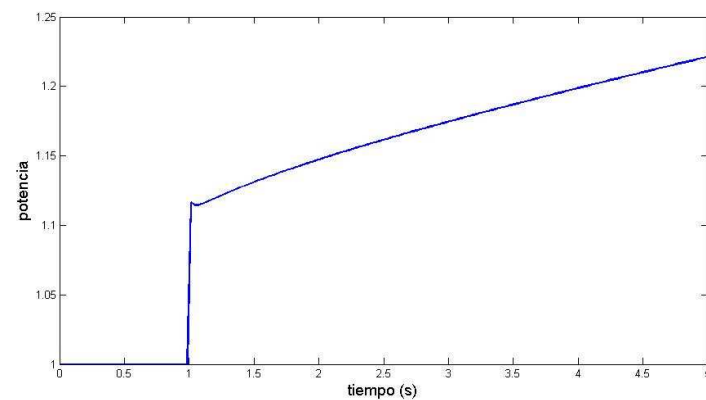


Figura 44. Inestabilidad de la solución para un paso de 0,029 seg.

Simulation time

Start time: 0.0 Stop time: 5

Solver options

Type: Fixed-step Solver: ode4 (Runge-Kutta)

Fixed-step size (fundamental sample time): 0.028

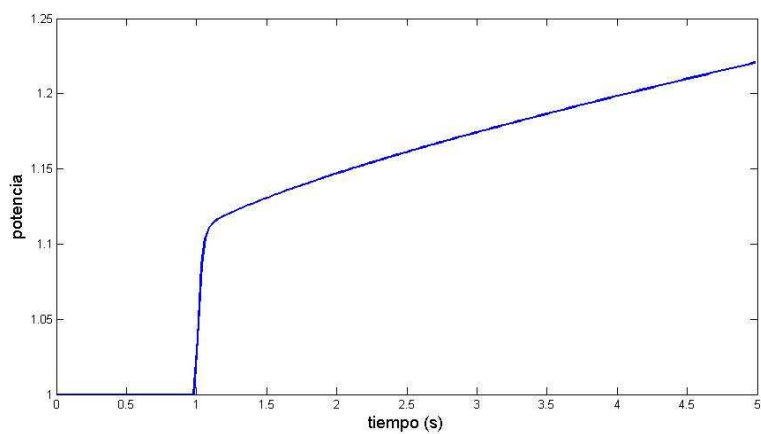


Figura 45. Convergencia de la solución para un paso de 0,028 seg.

ANEXO II

Resolución de la ecuación in-hour.

En el procedimiento que sigue a continuación se resuelve la ecuación in-hour en forma cuasi-analítica para dos casos de estudio.

Caso 1: una inserción de 0,1 dólar a un reactor inicialmente crítico y estacionario sin fuente.

DATOS

$$\Lambda_{est} := 0.0125 \quad \text{dolar} := 0.1$$

$$\beta_1 := 0.00021 \quad \lambda_1 := 0.0124$$

$$\beta_2 := 0.00141 \quad \lambda_2 := 0.0305$$

$$\beta_3 := 0.00127 \quad \lambda_3 := 0.111$$

$$\beta_4 := 0.00255 \quad \lambda_4 := 0.301$$

$$\beta_5 := 0.00074 \quad \lambda_5 := 1.14$$

$$\beta_6 := 0.00027 \quad \lambda_6 := 3.01$$

$$\beta := \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6$$

$$\beta = 6.45 \times 10^{-3}$$

$$\Lambda := \Lambda_{est} \cdot \beta$$

$$\Lambda = 8.0625 \times 10^{-5}$$

$$\rho(\omega) := \Lambda \cdot \omega + \omega \cdot \left(\frac{\beta_1}{\lambda_1 + \omega} + \frac{\beta_2}{\lambda_2 + \omega} + \frac{\beta_3}{\lambda_3 + \omega} + \frac{\beta_4}{\lambda_4 + \omega} + \frac{\beta_5}{\lambda_5 + \omega} + \frac{\beta_6}{\lambda_6 + \omega} \right)$$

$$\rho_e := \text{dolar} \cdot \beta$$

$$\rho_e = 6.45 \times 10^{-4}$$

$$F(\omega) := \rho(\omega) - \rho_e$$

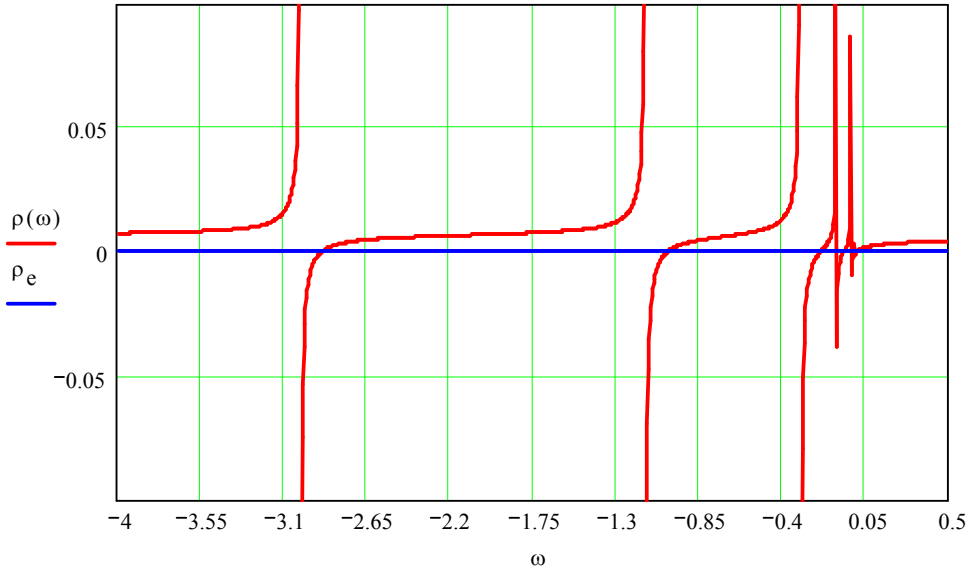


Figura 46. Graficación de la solución de la ecuación in-hour.

$\omega_7 := -72.4$	$\omega_6 := -2.88$	$\omega_5 := -1.01$
$s_7 := \text{root}(F(\omega_7), \omega_7)$	$s_6 := \text{root}(F(\omega_6), \omega_6)$	$s_5 := \text{root}(F(\omega_5), \omega_5)$
$s_7 = -72.455783894$	$s_6 = -2.8835038055$	$s_5 = -1.0121907222$
$\omega_4 := -0.187$	$\omega_3 := -0.0626$	$\omega_2 := -0.0137$
$s_4 := \text{root}(F(\omega_4), \omega_4)$	$s_3 := \text{root}(F(\omega_3), \omega_3)$	$s_2 := \text{root}(F(\omega_2), \omega_2)$
$s_4 = -0.1873299287$	$s_3 = -0.0626053014$	$s_2 = -0.0137620404$
$\omega_1 := 0.0102$		
$s_1 := \text{root}(F(\omega_1), \omega_1)$		
$s_1 = 0.0101614827$		

$$B(\omega) := \frac{\Lambda \cdot \omega + \omega \cdot \left(\frac{\beta_1}{\lambda_1 + \omega} + \frac{\beta_2}{\lambda_2 + \omega} + \frac{\beta_3}{\lambda_3 + \omega} + \frac{\beta_4}{\lambda_4 + \omega} + \frac{\beta_5}{\lambda_5 + \omega} + \frac{\beta_6}{\lambda_6 + \omega} \right)}{\left[\Lambda \cdot \omega + \omega \cdot \left[\frac{\beta_1 \cdot \lambda_1}{(\lambda_1 + \omega)^2} + \frac{\beta_2 \cdot \lambda_2}{(\lambda_2 + \omega)^2} + \frac{\beta_3 \cdot \lambda_3}{(\lambda_3 + \omega)^2} + \frac{\beta_4 \cdot \lambda_4}{(\lambda_4 + \omega)^2} + \frac{\beta_5 \cdot \lambda_5}{(\lambda_5 + \omega)^2} + \frac{\beta_6 \cdot \lambda_6}{(\lambda_6 + \omega)^2} \right] \right]}$$

$$B(s_7) = -0.1097080774 \quad B(s_6) = -4.3324614514 \times 10^{-3} \quad B(s_5) = -0.0118413665$$

$$B(s_4) = -0.0397829176 \quad B(s_3) = -0.0877922002 \quad B(s_2) = -0.029815683 \quad B(s_1) = 1.2832498714$$

$$n(t) := B(s_1) \cdot e^{s_1 \cdot t} + B(s_2) \cdot e^{s_2 \cdot t} + B(s_3) \cdot e^{s_3 \cdot t} + B(s_4) \cdot e^{s_4 \cdot t} + B(s_5) \cdot e^{s_5 \cdot t} + B(s_6) \cdot e^{s_6 \cdot t} + B(s_7) \cdot e^{s_7 \cdot t}$$

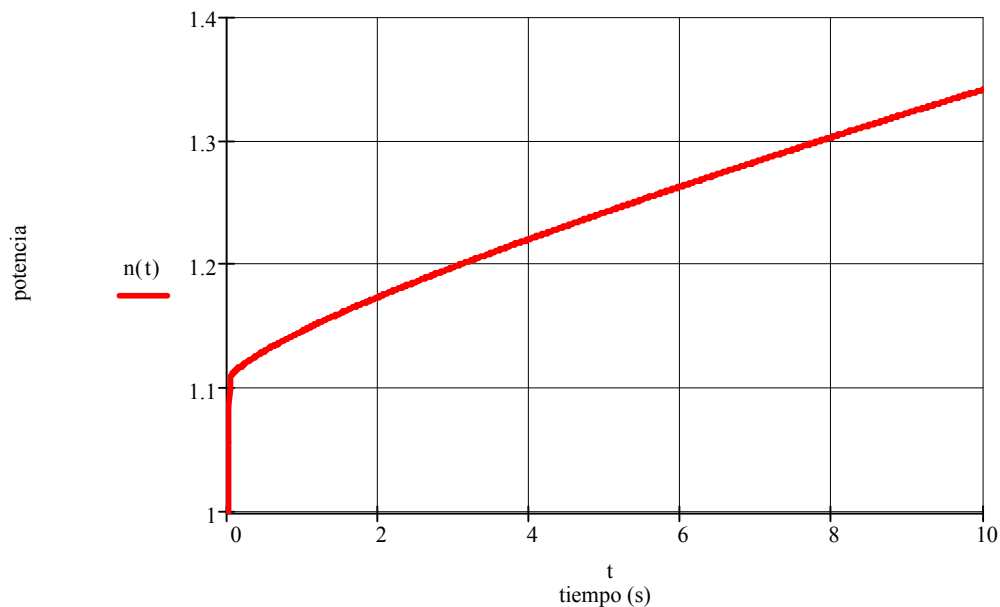


Figura 47. Evolución de la potencia.

Caso 2: una inserción de -2 dólar a un reactor inicialmente crítico y estacionario sin fuente.

DATOS

$$\Lambda_{est} := 0.012^{\circ}$$

$$\text{dolar} := -2$$

$$\beta_1 := 0.0002^{\circ}$$

$$\lambda_1 := 0.012^{\circ}$$

$$\beta_2 := 0.0014^{\circ}$$

$$\lambda_2 := 0.030^{\circ}$$

$$\beta_3 := 0.0012^{\circ}$$

$$\lambda_3 := 0.111$$

$$\beta_4 := 0.0025^{\circ}$$

$$\lambda_4 := 0.301$$

$$\beta_5 := 0.0007^{\circ}$$

$$\lambda_5 := 1.14$$

$$\beta_6 := 0.0002^{\circ}$$

$$\lambda_6 := 3.01$$

$$\beta := \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6$$

$$\beta = 6.45 \times 10^{-3}$$

$$\Lambda := \Lambda_{est} \cdot \beta$$

$$\Lambda = 8.0625 \times 10^{-5}$$

$$\rho(\omega) := \Lambda \cdot \omega + \omega \cdot \left(\frac{\beta_1}{\lambda_1 + \omega} + \frac{\beta_2}{\lambda_2 + \omega} + \frac{\beta_3}{\lambda_3 + \omega} + \frac{\beta_4}{\lambda_4 + \omega} + \frac{\beta_5}{\lambda_5 + \omega} + \frac{\beta_6}{\lambda_6 + \omega} \right)$$

$$\rho_e := \text{dolar} \cdot \beta$$

$$\rho_e = -0.0129$$

$$F(\omega) := \rho(\omega) - \rho_e$$

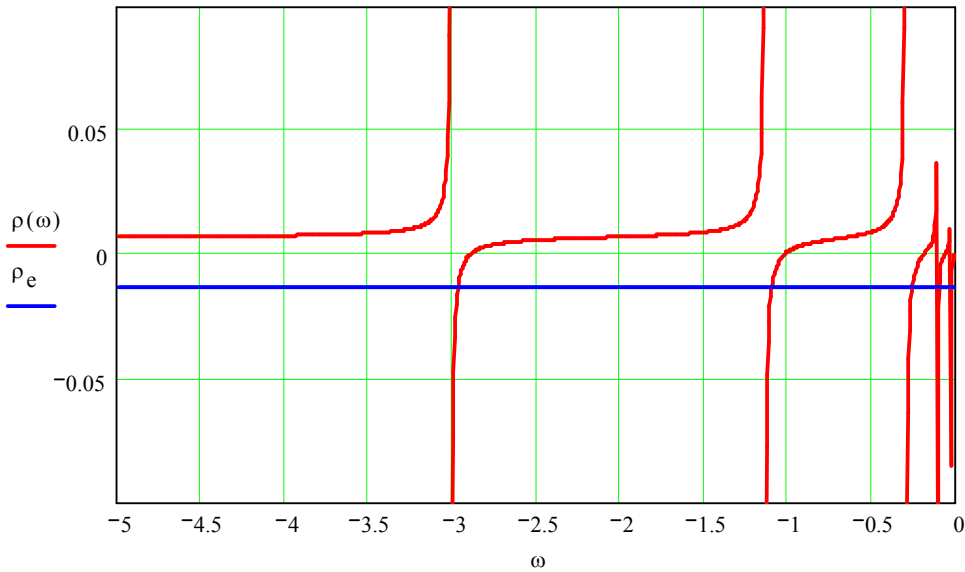


Figura 48. Graficación de la solución de la ecuación in-hour.

$$\omega_7 := -240$$

$$\omega_6 := -3$$

$$\omega_5 := -1.097$$

$$s_7 := \text{root}(F(\omega_7), \omega_7)$$

$$s_6 := \text{root}(F(\omega_6), \omega_6)$$

$$s_5 := \text{root}(F(\omega_5), \omega_5)$$

$$s_7 = -240.1356237465$$

$$s_6 = -2.9693301225$$

$$s_5 = -1.0978017085$$

$$\omega_4 := -0.261$$

$$\omega_3 := -0.101$$

$$\omega_2 := -0.0274$$

$$s_4 := \text{root}(F(\omega_4), \omega_4)$$

$$s_3 := \text{root}(F(\omega_3), \omega_3)$$

$$s_2 := \text{root}(F(\omega_2), \omega_2)$$

$$s_4 = -0.2610444128$$

$$s_3 = -0.1016632074$$

$$s_2 = -0.0274279729$$

$$\omega_1 := -0.0121$$

$$s_1 := \text{root}(F(\omega_1), \omega_1)$$

$$s_1 = -0.0121797018$$

$$B(\omega) := \frac{\Lambda \cdot \omega + \omega \cdot \left(\frac{\beta_1}{\lambda_1 + \omega} + \frac{\beta_2}{\lambda_2 + \omega} + \frac{\beta_3}{\lambda_3 + \omega} + \frac{\beta_4}{\lambda_4 + \omega} + \frac{\beta_5}{\lambda_5 + \omega} + \frac{\beta_6}{\lambda_6 + \omega} \right)}{\left[\Lambda \cdot \omega + \omega \cdot \left[\frac{\beta_1 \cdot \lambda_1}{(\lambda_1 + \omega)^2} + \frac{\beta_2 \cdot \lambda_2}{(\lambda_2 + \omega)^2} + \frac{\beta_3 \cdot \lambda_3}{(\lambda_3 + \omega)^2} + \frac{\beta_4 \cdot \lambda_4}{(\lambda_4 + \omega)^2} + \frac{\beta_5 \cdot \lambda_5}{(\lambda_5 + \omega)^2} + \frac{\beta_6 \cdot \lambda_6}{(\lambda_6 + \omega)^2} \right] \right]}$$

$$B(s_7) = 0.6659118293$$

$$B(s_6) = 8.8737344819 \times 10^{-3}$$

$$B(s_5) = 0.0247268537$$

$$B(s_4) = 0.1010201519$$

$$B(s_3) = 0.0774726078$$

$$B(s_2) = 0.1022585269$$

$$B(s_1) = 0.0195642052$$

$$n(t) := B(s_1) \cdot e^{s_1 \cdot t} + B(s_2) \cdot e^{s_2 \cdot t} + B(s_3) \cdot e^{s_3 \cdot t} + B(s_4) \cdot e^{s_4 \cdot t} + B(s_5) \cdot e^{s_5 \cdot t} + B(s_6) \cdot e^{s_6 \cdot t} + B(s_7) \cdot e^{s_7 \cdot t}$$

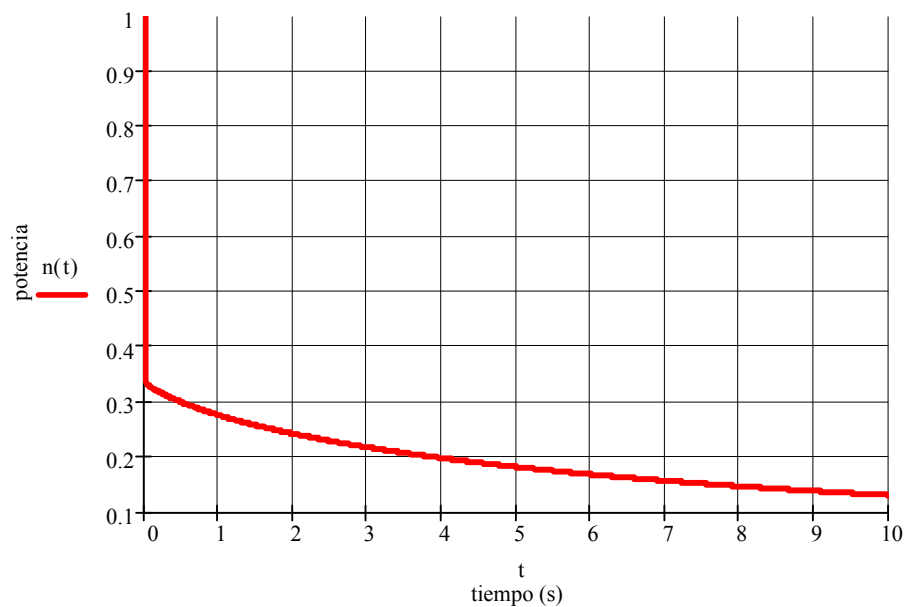


Figura 49. Evolución de la potencia.

ANEXO III

Simulador CAREM

Modelo dinámico de planta utilizado

Este modelo divide el recipiente de presión en dos zonas: el domo y el circuito. A su vez el circuito se divide en: generador de vapor, downcommer, plenum inferior, núcleo y la chimenea. La figura siguiente muestra el modelo compartimentado de referencia. Ver bibliografía (5) y (6).

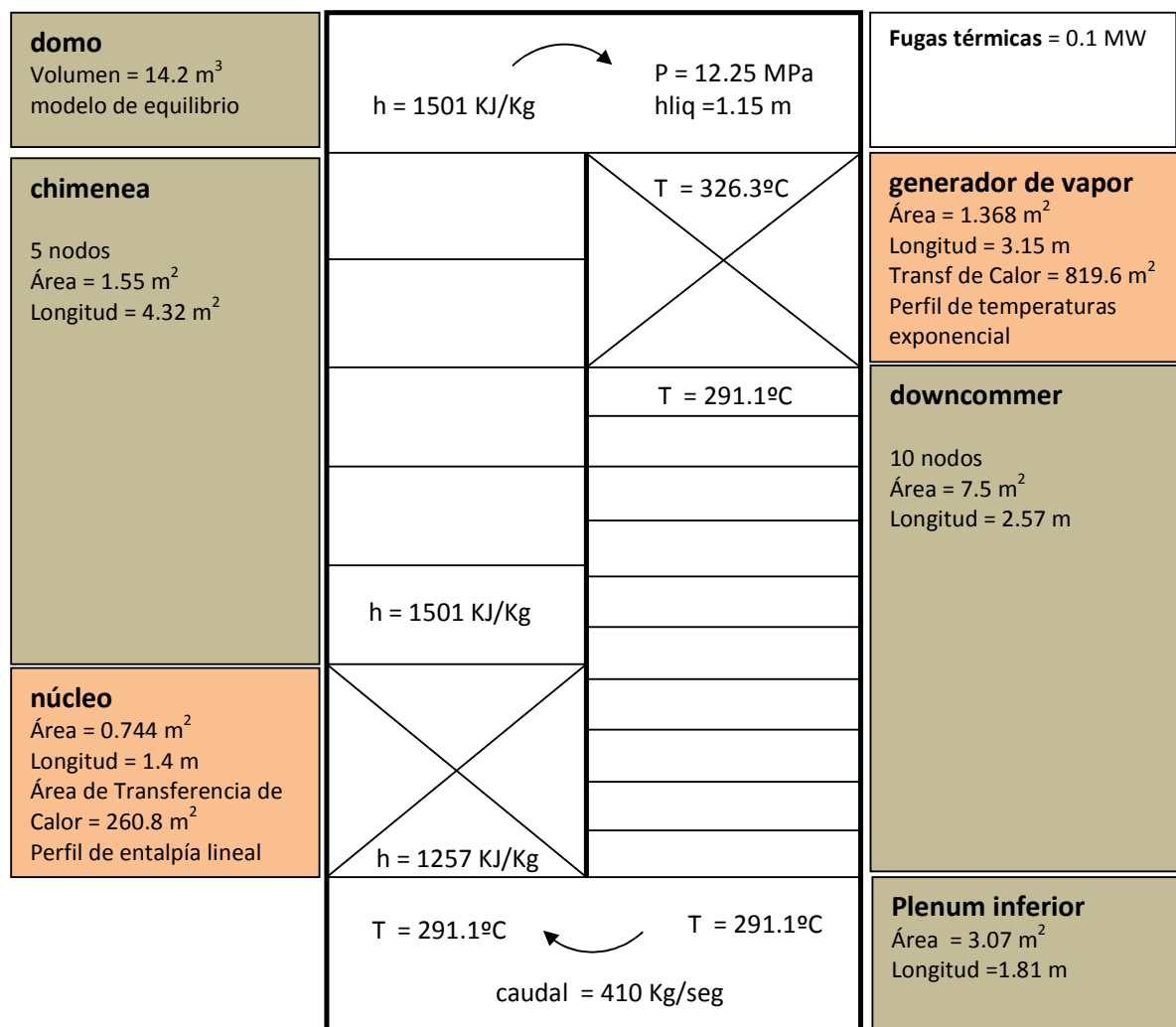


Figura 50. Esquema del modelo utilizado del primario.

El punto trabajo del reactor está descripto por los parámetros:

Pot0 = 100MW. Potencia neutrónica.

$P_e = 0.1\text{MW}$. Fugas térmicas al exterior.

$w_0 = 410\text{ Kg/seg}$. Caudal másico del circuito.

$P_0 = 12.25\text{ Mpa}$. Presión del RPV.

$T_f = 700^\circ\text{C}$. Temperatura del combustible.

$T_s = 260.14^\circ\text{C}$. Temperatura de alimentación al generador de vapor.

Los parámetros definidos fueron obtenidos del estacionario del reactor trabajando a 100% de potencia.

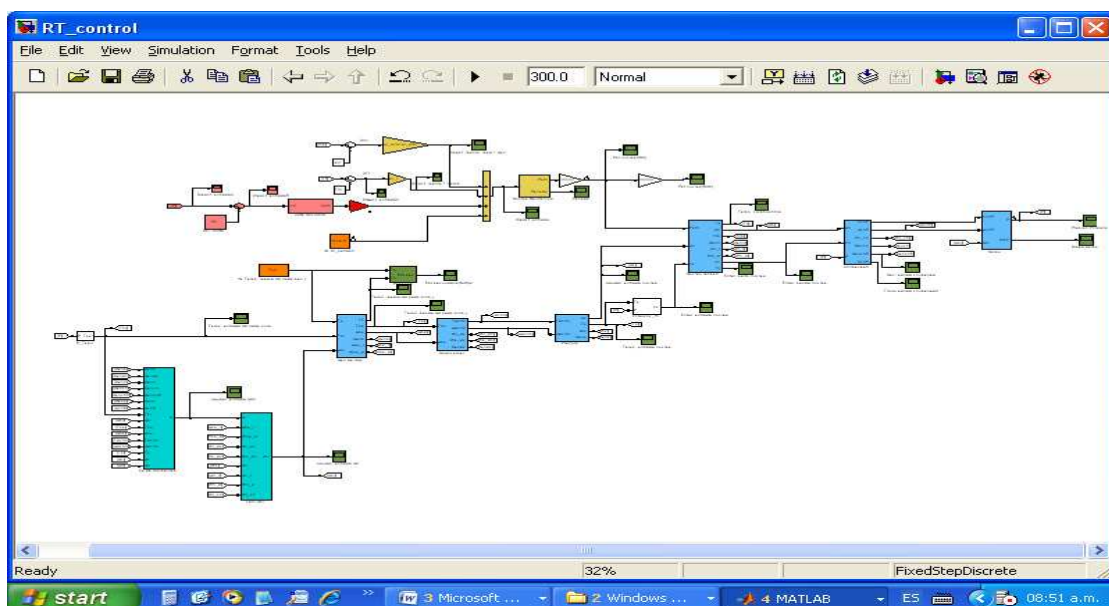


Figura 11. Modelo de planta implementado en MATLAB-SIMULINK

La Figura 11 muestra el modelo implementado en MATLAB-SIMULINK y en ella pueden observarse los diferentes nodos del modelo. Los colores diferencian la termohidráulica de la cinética y del control.

Termohidráulica

El análisis termohidráulico que se considera se basa en las siguientes simplificaciones:

- “El problema se resuelve en forma unidimensional. La variable espacial se toma en sentido de circulación del fluido.”
- “Para resolver la zona bifásica de líquido y vapor (núcleo y chimenea) se usa el modelo homogéneo, o sea que se trata a la mezcla como un pseudo-fluido que obedece las ecuaciones de simple fase (no se consideran diferencias de velocidades entre vapor y líquido).”

- “No existe arrastre de burbujas hacia el generador de vapor y se considera que el líquido que ingresa al generador de vapor se encuentra en saturación.”
- “En todo el circuito se considera que la presión es la misma e igual a la del domo, y no se tienen en cuenta diferencias de presión por columna de agua.”
- “Solo se considera intercambio de calor en la zona del núcleo y del generador de vapor (que son variables), y una pérdida de calor constante en el domo. El intercambio de calor en el núcleo es gobernada por la diferencia de temperaturas medias del refrigerante y del combustible, considerando un perfil lineal de entalpía en sentido vertical. El intercambio de calor en el generador de vapor es gobernada por la diferencia de temperaturas medias del refrigerante y del secundario (condición de contorno), considerando un perfil de temperaturas exponencial del lado primario y constante del lado secundario.”
- “No se consideran los caudales de by-pass del generador de vapor, ni del núcleo.”

El comportamiento termohidráulico del reactor se describe por medio de los bloques de color celeste. Los mismos se describen de izquierda a derecha.

Básicamente el modelo termohidráulico describe los balances de masa y energía. El balance de energía se expresa mediante una ecuación diferencial que determina en algunos casos la entalpía y en otros la temperatura, del balance de masa se obtiene el caudal de refrigeración.

Por otro lado se considera la conservación de momento en forma integral para cerrar el cálculo del circuito.

Cinética Neutrónica

Se utilizó un modelo de cinética puntual a un solo grupo de neutrones retardados sin linealizar. Para definir la realimentación de reactividad se consideró una variación lineal por temperatura del moderador (en este caso también refrigerante), por temperatura del combustible y por densidad del moderador.

Bibliografía:

- (1) Ingeniería De Reactores Nucleares, S. Glasstone, Ed. Reverté.
- (2) Cinética De Reactores, L. Pecos – A. Gómez – L. Wentzeis – P. Bellino
- (3) Reactor Simulation Development, IAEA.
- (4) Controller System to Aid Diagnostics, J. Bernard, MIT.
- (5) Análisis preliminar del lazo de control de presión del circuito primario a potencia nominal, C. Flury, Proyecto CAREM.
- (6) Desarrollo de controladores software en Sistemas de Control Distribuido y su validación usando modelos simulados de planta, Pablo Gustavo Juárez del Valle.